



Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών Τηλεπικοινωνιών &
Δικτύων

Συλλογή και Συνάθροιση Δεδομένων σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων με Χρήση Ενεργειακά Αποδοτικού Πρωτοκόλλου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χριστίνα Χ. Παπαβασιλείου

Εξεταστική Επιτροπή:

Σταμούλης Γεώργιος
Καθηγητής Τ.Μ.Η.Υ.Τ.Δ – Π.Θ

Κίκiras Παναγιώτης
Συμβασιούχος Διδάσκων ΠΔ 407/80

Βόλος, Φεβρουάριος 2011



Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών Τηλεπικοινωνιών &
Δικτύων

Συλλογή και Συνάθροιση Δεδομένων σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων με Χρήση Ενεργειακά Αποδοτικού Πρωτοκόλλου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χριστίνα Χ. Παπαβασιλείου

Εξεταστική Επιτροπή:

Σταμούλης Γεώργιος
Καθηγητής Τ.Μ.Η.Υ.Τ.Δ – Π.Θ

Κίκιρας Παναγιώτης
Συμβασιούχος Διδάσκων ΠΔ 407/80

Βόλος, Φεβρουάριος 2011

.....
Χριστίνα Χ.Παπαβασιλείου

Διπλωματούχα Μηχανικός Ηλεκτρονικών Υπολογιστών Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Copyright © Χριστίνα Χ.Παπαβασιλείου, 2011

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν την συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων του Τμήματος Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Πέραν της προσωπικής προσπάθειας που κατεβλήθη καθ' όλη τη διάρκεια της ακόλουθης μελέτης, βασικό ρόλο στην διαμόρφωση της τελικής μορφής έπαιξαν διάφοροι συνεργάτες, οι οποίοι με την προσφορά τους διευκόλυναν σημαντικά το έργο μου.

Αναγνωρίζοντας την πολύτιμη συμβολή του για τη διεκπεραίωση αυτής της εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Γεώργιο Σταμούλη για την υποστήριξη, τη συμπαράσταση, το χρόνο και την προσωπική γνώση που μου προσέφερε για την κατανόηση του αντικειμένου της διπλωματικής εργασίας και το ευχάριστο κλίμα συνεργασίας κάτω από το οποίο αυτή πραγματοποιήθηκε. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Παναγιώτη Κίικρα για την συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή, καθώς και τον διδακτορικό φοιτητή Αποστόλη Ξενάκη τόσο για την υποστήριξη σε ψυχολογικό και εργαστηριακό επίπεδο όσο και για τις συμβουλές που μου προσέφερε στην αντιμετώπιση τυχόν δυσκολιών.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους δικούς μου ανθρώπους, οικογένεια και φίλους που στάθηκαν αρωγοί και συμπαραστάτες στην προσπάθεια μου να ολοκληρώσω με επιτυχία τις σπουδές μου.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	5
Ευρετήριο Εικόνων	9
Ευρετήριο Πινάκων	10
Περίληψη	11
Abstract.....	12
Κεφάλαιο 1ο – Εισαγωγή	13
1.1 Γενική περιγραφή των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων	13
1.1.1 Χαρακτηριστικά των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων	13
1.1.2 Προβλήματα και Περιορισμοί των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων.....	15
1.1.3 Είδη αισθητήρων.....	16
1.2 Διαφορές με άλλα Δίκτυα	17
1.3 Εφαρμογές.....	19
1.3.1 Στρατιωτικές εφαρμογές.....	20
1.3.2 Παρακολούθηση ειδών.....	21
1.3.3 Παρακολούθηση περιβάλλοντος	22
1.3.4 Εφαρμογές υγείας	23
1.3.5 Οικιακές εφαρμογές.....	24
1.3.6 Γεωργία.....	24
Κεφάλαιο 2ο – Αρχιτεκτονική Δικτύου Αισθητήρων	26
2.1 Αρχιτεκτονική Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων	26
2.2 Αρχιτεκτονική κόμβου.....	27
2.3 Σχεδιαστικοί παράγοντες.....	31
2.3.1 Ανοχή σε λάθη (Fault tolerance).....	31
2.3.2 Επεκτασιμότητα (Scalability)	32
2.3.3 Κόστος Παραγωγής (Production Cost)	33
2.3.4 Τοπολογία (Sensor Network Topology)	33
2.3.5 Περιβάλλον (Environment)	34
2.3.6 Μέσα μετάδοσης (Transmission Media)	35
2.3.7 Κατανάλωση ενέργειας (Power Consumption)	36
2.3.8 Διάρκεια ζωής (Lifetime).....	37
2.3.9 QoS.....	38
2.3.10 Ασφάλεια (Security).....	39
2.3.11 Περιορισμοί υλικού (Hardware Constraint)	40
2.4 Protocol Stack.....	40
2.4.1 Φυσικό στρώμα (Physical layer).....	41
2.4.2 Στρώμα ζεύξης δεδομένων (Data link layer)	41
2.4.3 Στρώμα δικτύου (Network layer).....	42
2.4.4 Στρώμα μεταφοράς (Transport layer)	42

2.4.5 Στρώμα εφαρμογής (Application layer)	43
2.4.6 Επίπεδο διαχείρισης ενέργειας (Power management plane)	43
2.4.7 Επίπεδο διαχείρισης κινητικότητας (Mobility management plane)	44
2.4.8 Επίπεδο διαχείρισης έργου (Task management plane)	44
Κεφάλαιο 3ο – Πρωτόκολλα Δρομολόγησης	45
3.1 Εισαγωγή	45
3.2 Δεδομένο-κεντρικά πρωτόκολλα δρομολόγησης	47
3.2.1 Flooding και Gossiping	47
3.2.2 SPIN (Sensor Protocol for Information via Negotiation)	47
3.2.3 Directed Diffusion	49
3.2.4 Energy Aware Routing	50
3.2.5 Rumor Routing	51
3.2.6 Gradient Based Routing	52
3.2.7 CADR (Constrained Anisotropic Diffusion Routing)	52
3.3 Ιεραρχικά πρωτόκολλα δρομολόγησης.....	53
3.3.1 LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)	53
3.3.2 PEGASIS & Ιεραρχικό PEGASIS	54
3.3.3 TEEN & APTEEN	56
3.3.4 Energy – Aware routing for cluster based sensor networks	58
3.3.5 Self-organizing Protocol	59
3.3 Πρωτόκολλα δρομολόγησης βασισμένα στη θέση.....	60
3.4.1 MECN & SMECN	61
3.4.2 GAF (Geographical Adaptive Fidelity)	63
3.4.3 GEAR (Geographically and Energy Aware Routing).....	64
3.4.4 Τεχνικές εύρεσης θέσης	66
3.5 Πρωτόκολλα δρομολόγησης βασισμένα στη ροή του δικτύου και στην ποιότητα της υπηρεσίας.....	70
3.5.1 Maximum lifetime energy routing.....	70
3.5.2 Energy Aware QoS Routing Protocol	71
3.5.3 Maximum lifetime data gathering.....	71
3.5.4 Minimum Cost Forwarding	72
3.5.4 Sequential Assignment Routing SAR	73
3.5.6 Speed	74
3.6 Σύνοψη των πρωτοκόλλων δρομολόγησης.....	75
Κεφάλαιο 4ο – Μελέτη Πρωτοκόλλου	77
4.1 Προτεινόμενο Μοντέλο Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων	77
4.2 Προτεινόμενο Πρωτόκολλο	79
4.2.1 Αρχικοποίηση Πρωτοκόλλου	80
4.2.2 Η φάση αναμονής	82
4.2.3 Η φάση σχεδίασης μονοπατιού	82

4.2.4 Η φάση μετάδοσης δεδομένων.....	85
4.3 Μετρικές απόδοσης.....	85
4.4 Οργάνωση Πειραμάτων	86
4.4.1 Παραδοχές.....	86
4.4.2 Μελέτη Περίπτωσης: 1	87
4.4.2.1 Παράμετροι	87
4.4.2.2 Αποτελέσματα	88
4.4.3 Μελέτη Περίπτωσης: 2	93
4.4.3.1 Παράμετροι	93
4.4.3.2 Αποτελέσματα	94
Κεφάλαιο 5ο – Μελλοντική έρευνα -Συμπεράσματα	95
5.1 Μελλοντική έρευνα –Συμπεράσματα	95
Βιβλιογραφία	96

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1: Ασύρματοι κόμβοι και δίκτυα αισθητήρων.....	13
Εικόνα 2: Δομή επικοινωνίας δικτύων αισθητήρων [Akyildiz et al., 5].....	26
Εικόνα 3: Sensor Node Hardware components [Akyildiz et al., 5].	28
Εικόνα 4: Ένας πραγματικός αισθητήρας.....	29
Εικόνα 5: Κόμβος Mica της Xbow.....	30
Εικόνα 6: Κόμβος μNode της Ambient Systems	30
Εικόνα 7: Στοιβά Πρωτοκόλλων Ασύρματου Κόμβου [Akyildiz et al., 5].....	41
Εικόνα 8: Πρωτόκολλα δρομολόγησης ανάλογα με τον τρόπο συμμετοχής των κόμβων. ...	46
Εικόνα 9: Πρωτόκολλο SPIN. [Akkaya et al., 6].....	48
Εικόνα 10: Φάσεις Λειτουργίας του πρωτοκόλλου Directed Diffusion [Akkaya et al., 6].....	49
Εικόνα 11: Η αλυσίδα λειτουργίας του PEGASIS [Lindsey et al., 21].....	55
Εικόνα 12: Συγκέντρωση των δεδομένων με ένα δυαδικό τρόπο βασισμένο σε αλυσίδα [Lindsey et al., 22].....	56
Εικόνα 13: Ιεραρχική ομαδοποίηση στο TEEN και στο APTEEN [Agrawal et al., 23].....	57
Εικόνα 14: Μια τυπική ομάδα σε ένα δίκτυο αισθητήρων [Akkaya et al., 6].	59
Εικόνα 15: Περιοχή αναμετάδοσης ενός ζευγαριού κόμβων πομπού - αναμεταδότη (i,r) στο MECN [Rodoplu et al., 26].....	62
Εικόνα 16: Παράδειγμα ενός εικονικού πλέγματος στο GAF [Y.Xu et al., 28].	63
Εικόνα 17: Αλλαγές κατάστασης στο GAF [Y.Xu et al., 28].	63
Εικόνα 18: Αναδρομική γεωγραφική δρομολόγηση στο GEAR [Y. Yu et al., 29].....	65
Εικόνα 19: Σχήμα του ορίζοντα όπως φαίνεται από μία κάμερα	69
Εικόνα 20: Μοντέλο ερωτημάτων σε ένα κόμβο [Akkaya et al., 6].	71
Εικόνα 21: Συστατικά δρομολόγησης του SPEED [He et al., 36].	74
Εικόνα 22: Φάσεις Πρωτοκόλλου.	79
Εικόνα 23: Ευκλείδειες Αποστάσεις των 4 cluster heads επιπέδου 2 από τον σταθμό βάσης.	88
Εικόνα 24: Δρομολόγηση με το απευθείας πρωτόκολλο.	89
Εικόνα 25: Δρομολόγηση με το προτεινόμενο πρωτόκολλο.	89
Εικόνα 26: Μέσος όρος διάρκειας ζωής δικτύου για προτεινόμενο και απευθείας πρωτόκολλο.....	91
Εικόνα 27: Ποσοστό επιτυχούς παράδοσης μηνυμάτων για διαφορετικές αρχικές ενέργειες.....	92
Εικόνα 28: Μέσος όρος διάρκειας ζωής δικτύου για προτεινόμενο και απευθείας πρωτόκολλο με αποτυχία ή χωρίς στον κόμβο B.	94

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: Διαθέσιμοι εμπορικά αισθητήρες για χρήση σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων... 17	17
Πίνακας 2: Mica και μnode στοιχεία..... 29	29
Πίνακας 3: Σύγκριση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης για δίκτυα αισθητήρων..... 76	76
Πίνακας 4: Παράμετροι Προσομοίωσης για την 1 ^η μελέτη περίπτωσης. 87	87
Πίνακας 5: Χρόνος που ο πρώτος cluster head πεθαίνει για διαφορετικές αρχικές ενέργειες. 90	90
Πίνακας 6: Αριθμός μηνυμάτων που στάλθηκαν και παραδόθηκαν στον σταθμό βάσης. 91	91
Πίνακας 7: Παράμετροι Προσομοίωσης για την 2 ^η μελέτη περίπτωσης. 93	93

Περίληψη

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελούν τα τελευταία χρόνια μία περιοχή με μεγάλη ερευνητική δραστηριότητα. Οι ιδιαιτερότητες αυτών των δικτύων καθιστούν τη μελέτη τους ξεχωριστή από τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες ασύρματων δικτύων (όπως Ad – Hoc ή IEEE 802.11). Τα δίκτυα αυτά αποτελούνται από μικρού μεγέθους κόμβους που έχουν περιορισμένη αυτονομία και υπολογιστικές δυνατότητες.

Κατά τη συλλογή δεδομένων από τους κόμβους του δικτύου καθοριστικό ρόλο παίζει η κατανάλωση ενέργειας σε κάθε κόμβο και για αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί κάποιες τεχνικές που έχουν ως στόχο την ελαχιστοποίηση της. Τέτοιες τεχνικές είναι η συνάθροιση πακέτων δεδομένων που στοχεύουν στην μείωση του συνολικού φορτίου του δικτύου καθώς και χρήση πρωτοκόλλων δρομολόγησης και συλλογής που λαμβάνουν υπόψη τους την μείωση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας σε ένα δίκτυο.

Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι οργανωμένη σε πέντε κεφάλαια από τα οποία τα τρία πρώτα αποτελούν την βιβλιογραφική επισκόπηση του θέματος. Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί το εισαγωγικό κεφάλαιο της εργασίας και αναφέρεται στα χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, στις διαφορές τους με άλλα δίκτυα και στις εφαρμογές τους. Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στην αρχιτεκτονική ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, καθώς και στους παράγοντες που επηρεάζουν τον σχεδιασμό του. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια ταξινόμηση και παρουσίαση των πιο κοινών πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ένα ενεργειακά αποδοτικό προτεινόμενο πρωτόκολλο, μελετούνται κάποιες περιπτώσεις εφαρμογής του και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα. Στο τελευταίο κεφάλαιο εκτίθενται τα συμπεράσματα της έρευνας μας και τέλος προτείνονται θέματα που απαιτούν περαιτέρω μελέτη.

Abstract

Wireless sensor networks are the last few years a region with a great research activity. Because of their specific features these networks require separate study by the already existing technologies of wireless networks (such as ad-hoc or IEEE 802.11). These networks consist of small nodes which have limited autonomy and calculative possibilities.

The energy consumption in each node plays an important role during the collection of data from the nodes of the network and for this reason have developed some techniques to minimize the energy consumption. Such techniques are data aggregation that designed to reduce the overall load of the network as well as the use of routing protocols and collection that shall take into account the reduction of overall energy consumption in a network.

This diplomatic work is organized in five chapters from which the first three are the theoretical overview of the matter. The first chapter is the introductory chapter of the work and refers to the characteristics of wireless sensor networks, their differences with other networks and their applications. The second chapter refers to the architecture of a wireless sensor networks, as well as the factors that affect the design of the network. In the third chapter we have a classification and a presentation of the most common routing protocols. In the fourth chapter is presented an energy-efficient proposed protocol, are studied some cases and presented the results. In the last chapter are presented the conclusions of our research and finally proposed matters which require further study.

Κεφάλαιο 1ο – Εισαγωγή

1.1 Γενική περιγραφή των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από έναν μεγάλο αριθμό κόμβων αισθητήρων που αναπτύσσονται μέσα σε μια περιοχή, προκειμένου να ανιχνεύσουν κάποια σημαντικά γεγονότα (πχ. έλεγχος άγριας φύσης, έλεγχος δασών για φωτιά, έλεγχος κυκλοφορίας, ευφυείς επικοινωνίες, έξυπνα κτήρια). Αυτοί οι μικροσκοπικοί κόμβοι αισθητήρων χαρακτηριστικά παραδείγματα των οποίων φαίνονται στην **Εικόνα 1**, αποτελούνται από στοιχεία αισθητήρων, επεξεργασίας δεδομένων και επικοινωνίας. Καθένας από αυτούς τους κόμβους είναι σε θέση να συλλέγει και να στέλνει στοιχεία σε ένα σταθερό σταθμό βάσης μέσω ενός multihop ασύρματου δικτύου.

Τα δίκτυα αισθητήρων παρουσιάζουν ορισμένους περιορισμούς όσον αφορά την τοπική μνήμη, τη διάρκεια των μπαταριών, την ικανότητα υπολογισμών και επικοινωνίας, ενώ εύκολα μπορεί να συμβεί και το φαινόμενο αποτυχίας ενός κόμβου.



Εικόνα 1: Ασύρματοι κόμβοι και δίκτυα αισθητήρων.

1.1.1 Χαρακτηριστικά των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχουν διάφορα χαρακτηριστικά. Ωστόσο, ο αυξανόμενος αριθμός και η ποικιλία των εφαρμογών και σχεδίασης των ασύρματων δικτύων αισθητήρων καθιστούν δύσκολο να μιλήσουμε για ένα τυπικό ασύρματο δίκτυο αισθητήρων υπό μια ακριβή έννοια.

- **Ad-hoc:** Το δίκτυο μπορεί να επεκταθεί χωρίς να εξαρτάται από την ύπαρξη οποιασδήποτε εξωτερικής υποδομής, και χωρίς την απαίτηση προ-σχεδίασης, έχει τη δυνατότητα της αυτό-οργάνωσης και μπορεί να εκτελεί τις λειτουργίες του χωρίς επιτήρηση. Ένας χαρακτηριστικός τρόπος επέκτασης τους π.χ. σε ένα δάσος θα

ήταν η ρίψη των κόμβων από ένα αεροπλάνο. Σε μια τέτοια κατάσταση, είναι ευθύνη των κόμβων να προσδιορίσουν τη συνδεσιμότητα και την κατανομή του δικτύου.

- **Αυτοδιαμόρφωση:** Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων πρέπει να είναι σε θέση να διαμορφώνει τις περισσότερες λειτουργικές του παραμέτρους αυτόνομα και ανεξάρτητα από οποιαδήποτε εξωτερική διαμόρφωση. Για παράδειγμα, οι κόμβοι αισθητήρων πρέπει να μπορούν να καθορίζουν τη γεωγραφική τους θέση χρησιμοποιώντας μόνο τους άλλους αισθητήρες στο δίκτυο, αυτό ονομάζεται “self-location”. Επίσης πρέπει να είναι σε θέση να ανέχονται τις αποτυχίες κάποιων κόμβων, λόγω έλλειψης μπαταρίας κα.
- **Αυτάρκεια:** Το δίκτυο είναι σε θέση να διαχειρίζεται τους πόρους του (ενέργεια, εύρος ζώνης, επεξεργαστική ισχύ) με έναν βέλτιστο τρόπο ώστε να μεγιστοποιηθεί η διάρκεια ζωής του.
- **Επικοινωνία:** Οι αισθητήρες είναι σε θέση να επικοινωνήσουν ο ένας με τον άλλο καθώς και με μια εξωτερική υπολογιστική μονάδα, διαμορφώνοντας έτσι ένα “δίκτυο επικοινωνίας”. Ένα δίκτυο επικοινωνίας μπορεί να συμπεριλάβει όλους τους κόμβους στο δίκτυο ομοιόμορφα (κάθε κόμβος συνδέεται και επικοινωνεί με όλους τους γείτονές του) ή μπορεί να χρησιμοποιήσει την τοπική «συστοιχία» (cluster) (κάθε κόμβος συνδέεται με ένα “cluster head” και μπορεί έπειτα να επικοινωνήσουν ο ένας με τον άλλον).
- **Ικανότητες αντίληψης:** Οι κόμβοι είναι εξοπλισμένοι με συσκευές αντίληψης και μπορούν να ειδικευτούν για να ανιχνεύσουν ορισμένα γεγονότα που συμβαίνουν στο περιβάλλον όπως κίνηση, θερμότητα ή ήχο. Με τη χρησιμοποίηση αλγορίθμων το δίκτυο μπορεί να καταδείξει τις ικανότητες αντίληψης χωρίς το κόστος να έχει όλους τους κόμβους σε θέση να «αισθανθούν» όλα τα συμβάντα που είναι ενδιαφέροντα.
- **Μικρό μέγεθος - χαμηλό κόστος:** Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από κόμβους που είναι μικροί στο μέγεθος και με χαμηλό κόστος.
- **Συνειδητοποίηση θέσης:** Οι κόμβοι πρέπει να γνωρίζουν τη θέση τους, είτε με έναν απόλυτο τρόπο είτε σχετικά με ένα εσωτερικό σύστημα συντεταγμένων.
- **Αφύλακτη λειτουργία:** Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα δίκτυα αισθητήρων μόλις επεκταθούν, δεν υπόκεινται σε καμία ανθρώπινη επέμβαση.
- **Δυναμικές αλλαγές:** Ένα σύστημα δικτύων αισθητήρων πρέπει να προσαρμόζεται στην μεταβαλλόμενη συνδεσιμότητα καθώς και στην μεταβολή των περιβαλλοντικών ερεθισμάτων.
- **Συνεργασία και ενδοδιαδικτυακή επεξεργασία:** Σε μερικές εφαρμογές, ένας μόνο αισθητήρας δεν είναι ικανός να αποφασίσει εάν ένα γεγονός έχει συμβεί, αλλά πολλοί αισθητήρες πρέπει να συνεργαστούν για να ανιχνεύσουν ένα γεγονός και μόνο η κοινή τους απόφαση παρέχει αρκετές πληροφορίες. Οι πληροφορίες είτε

υποβάλλονται σε επεξεργασία μέσα στο δίκτυο με διάφορες μορφές για να μπορέσουν να επιτύχουν αυτήν τη συνεργασία, είτε κάθε κόμβος ξεχωριστά διαβιβάζει τις πληροφορίες του σε ένα κόμβο στην «άκρη» του δικτύου και εκεί γίνεται όλη η επεξεργασία.

- **Data centric:** Τα παραδοσιακά δίκτυα επικοινωνίας χαρακτηρίζονται από τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ δύο συγκεκριμένων συσκευών, όπου η κάθε μια έχει τη δική της μοναδική διεύθυνση. Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αυτό που είναι πιο σημαντικό είναι οι τιμές και όχι ο κόμβος που δίνει αυτή την τιμή.
- **Αβεβαιότητα μετρήσεων:** Τα σήματα που δειγματοληπτούν οι αισθητήρες ίσως περιλαμβάνουν θόρυβο ο οποίος μπορεί να καταστήσει τις μετρήσεις ανακριβείς.

1.1.2 Προβλήματα και Περιορισμοί των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων παρουσιάζουν ένα εντελώς διαφορετικό σύνολο από περιορισμούς σε σύγκριση με τους περιορισμούς που παρουσιάζονται στα παραδοσιακά ασύρματα δίκτυα.

Το πιο σημαντικό από αυτά είναι η ενέργεια. Αυτά τα δίκτυα αποτελούνται από συσκευές που πρέπει να είναι ενεργές αρκετή ώρα με μικρές μπαταρίες. Έρευνες που έχουν γίνει, έδειξαν ότι εάν κόμβος τρέχει με τη μέγιστη του δύναμη, η διάρκεια ζωής του κόμβου είναι τέσσερις μέρες. Αυτές οι τέσσερις μέρες πρέπει να κατανεμηθούν σε αρκετά χρόνια ζωής. Κάτι τέτοιο, για τα υπόλοιπα συστήματα δεν είναι κάτι που πρέπει να λαμβάνουν υπόψη, αλλά για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι κάτι το πολύ σημαντικό.

Το δεύτερο πολύ σημαντικό είναι η τοποθέτηση τους. Αντίθετα με τους κόμβους άλλων ασύρματων δικτύων, οι αισθητήρες συχνά πρέπει να τοποθετηθούν σε δύσκολες περιοχές, όπου οι τεχνικοί που θα τους εφαρμόσουν έχουν μειωμένη ορατότητα.

Ακόμα κάτι που γίνεται δύσκολα στους κόμβους αισθητήρων είναι να καθοριστεί για πιο λόγω χάθηκε ένα πακέτο. Οι πιθανοί λόγοι μπορεί να είναι λόγω υπερχειλίσης της ουράς, έλλειψης ενέργειας ή έλλειψης ασφάλειας. Για παράδειγμα, κάποιος εξωγενής παράγοντας μετακίνησε τον αισθητήρα, όπως κάποιο πουλί. Ακόμα ένας πιθανός λόγος για την απώλεια πακέτων είναι η συμφόρηση στο δίκτυο, οπότε κάποια πακέτα να μην μπορούν να μεταφερθούν και ειδικότερα αυτά που βρίσκονται πιο μακριά από τον κόμβο συγκέντρωσης δεδομένων (sink).

Ένα άλλο ζήτημα που πρέπει να αντιμετωπίσουν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι το κατά πόσο καλά μια περιοχή παρακολουθείται από το δίκτυο των αισθητήρων (coverage).

Επίσης, αντιμετωπίζουν κάποια προβλήματα λόγω των περιορισμών που υπάρχουν στους αισθητήρες, όπως:

- οι περιορισμένοι πόροι
- η μικρή υπολογιστική δύναμη
- η μικρή μνήμη
- η περιορισμένη και πολλές φορές, μη επαναφορτιζόμενη μπαταρία, λόγω του μεγέθους τους και των περιορισμών που αναφέραμε πιο πάνω
- το χαμηλό bandwidth λόγω της ασύρματης επικοινωνίας τους.

Λόγω αυτών και άλλων περιορισμών και προβλημάτων που έχουν να αντιμετωπίσουν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων υπάρχει ανάγκη για καινοτόμα συστήματα και πιο αποδοτικά πρωτόκολλα και αλγόριθμους.

1.1.3 Είδη αισθητήρων

Οι αισθητήρες είναι συσκευές, οι οποίες επιτρέπουν σε κάθε είδους ηλεκτρονικό εξοπλισμό να αντιλαμβάνεται τον φυσικό κόσμο. Βοηθούν τις ηλεκτρονικές συσκευές να βλέπουν, να ακούν, να οσφραίνονται, να γεύονται και να αγγίζουν. Όλα τα παραπάνω επιτυγχάνονται με την παροχή, από τους αισθητήρες, μιας διεπαφής (interface), η οποία αναλαμβάνει να μεταφράζει τα σήματα του φυσικού κόσμου σε κατανοητή μορφή για τις ηλεκτρονικές συσκευές. Έτσι, οι αισθητήρες μετατρέπουν μη ηλεκτρικές ή χημικές ποσότητες σε ηλεκτρικά σήματα.

Η κινητήριος δύναμη, η οποία έδωσε ώθηση στην τεχνολογία αισθητήρων, είναι η αλματώδης εξέλιξη στην επεξεργασία σήματος και στην μικρομηχανική τεχνολογία. Με την ανάπτυξη των μικροεπεξεργαστών και των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων συγκεκριμένης εφαρμογής, η επεξεργασία σήματος έγινε φτηνή, ακριβής και αξιόπιστη αυξάνοντας την συνολική ευφυΐα του ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Σήμερα, διατίθεται για χρήση μια ευρεία ποικιλία αισθητήρων, μερικούς από τους οποίους βλέπουμε στον **Πίνακα 1**. Ωστόσο, πριν από την επιλογή κάποιου αισθητήρα, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι απαιτήσεις της εφαρμογής για την οποία θα αναπτυχθεί το δίκτυο, ο ρυθμός δειγματοληψίας του αισθητήρα, οι απαιτήσεις σε τάση και σε ενέργεια.

Πίνακας 1: Διαθέσιμοι εμπορικά αισθητήρες για χρήση σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Τύπος	Current (mA)	Χρόνος Δειγματοληψίας (mS)	Voltage (V)
Θερμοκρασίας	1	400	2.5-5.5
Πίεσης	1	35	2.2-3.6
Υγρασίας	550uA	300	2.4-5.5
Μαγνητικός	4	30uS	-
Επιταχυνσιόμετρο	2	10	2.5-3.3
Ακουστικός	0.5	1	2.10
Κίνησης (Παθητικό IR)	0	1	-
Καπνού	5uA	-	6-12

1.2 Διαφορές με άλλα Δίκτυα

Παρόλο που τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχουν αρκετές ομοιότητες με τα ήδη υπάρχοντα ad hoc δίκτυα, έχουν και χαρακτηριστικά που τα διαφοροποιούν από αυτά. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων διαφέρουν από τα άλλα ασύρματα ad hoc δίκτυα στις εξής επτά περιοχές:

- **Μέγεθος δικτύου:** Ο αριθμός κόμβων σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων μπορεί να είναι αρκετής τάξης μεγέθους υψηλότερος απ' ότι σε ένα ad hoc δίκτυο. Το μέγεθος ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων μπορεί να είναι οποιοδήποτε από μερικούς μέχρι και πολλούς χιλιάδες κόμβους. Τα άλλα ασύρματα δίκτυα αποτελούνται συνήθως από λιγότερο από εκατό κόμβους π.χ. ένα bluetooth piconet μπορεί να αποτελείται το πολύ από οκτώ κόμβους.

- **Πυκνότητα κόμβων:** Η πυκνότητα κόμβων σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων είναι συνήθως υψηλή, με έναν μεγάλο αριθμό κόμβων σε μια σχετικά μικρή περιοχή, ενώ άλλα ασύρματα δίκτυα αποτελούνται συνήθως από λίγους κόμβους που βρίσκονται σε μικρή απόσταση ο ένας από τον άλλον. Αυτό οφείλεται στο μέγεθος των κόμβων. Ένας κόμβος ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων μπορεί να είναι τόσο μικρός όσο ένα νόμισμα του ευρώ, ενώ οι κόμβοι άλλων ασύρματων δικτύων είναι συνήθως φορητοί υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα.
- **Ροπή κόμβων στην αποτυχία:** Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων μπορεί να επεκτείνεται σε μια απομακρυσμένη ή απρόσιτη περιοχή. Σε τέτοιες περιστάσεις η ροπή κόμβων σε αποτυχία είναι υψηλή και οφείλεται στη πιθανότητα καταστροφής ή αποτυχίας των κόμβων. Επιπλέον, μερικοί κόμβοι μπορεί να εξαντλήσουν τους ενεργειακούς τους πόρους πιο γρήγορα από άλλους λόγω της ύπαρξης του στην πορεία δρομολόγησης που χρησιμοποιείται περισσότερο από άλλες πορείες. Οι κόμβοι σε άλλα ασύρματα δίκτυα έχουν επαναφορτιζόμενες πηγές ενέργειας και δεν υποβάλλονται σε δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες που θα μπορούσαν να τους βλάψουν ή να μην τους επιτρέψουν καν να λειτουργήσουν.
- **Συχνή αλλαγή τοπολογίας:** Σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων η συχνότητα αλλαγής της τοπολογίας είναι υψηλή. Αυτό οφείλεται σε διάφορους λόγους, όπως οι αποτυχίες υλικού, οι μειωμένες μπαταρίες, η προσθήκη νέων κόμβων, η κίνηση των κόμβων, οι διάφορες παρεμβολές καθώς και άλλοι περιβαλλοντικοί παράγοντες. Το δίκτυο πρέπει να είναι σε θέση να προσαρμοστεί σε αυτές τις αλλαγές που αφορούν τη θέση και τον αριθμό κόμβων. Η αλλαγή τοπολογίας μπορεί να συμβεί τόσο συχνά, όπως κάθε λίγα χιλιοστά του δευτερολέπτου. Σε άλλα ασύρματα δίκτυα οι κόμβοι συνήθως «ζητούν» να συνδεθούν στο δίκτυο και αποσυνδέονται από το δίκτυο μετά από μια ορισμένη χρονική περίοδο, η οποία σπανίως είναι μικρότερη από μερικά λεπτά. Έτσι, οι εφαρμογές απαιτούν έναν βαθμό ανοχής σφαλμάτων και τη δυνατότητα να αυτό-οργανωθούν καθώς η τοπολογία εξελίσσεται κατά τη διάρκεια του χρόνου.
- **Παράδειγμα επικοινωνίας που υιοθετείται:** Σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων το είδος επικοινωνίας που υιοθετείται είναι broadcast, δηλαδή η πληροφορία κοινοποιείται σε όλους. Αυτό συμβαίνει γιατί ο κάθε κόμβος δεν γνωρίζει ολόκληρο το μέγεθος του δικτύου και οι κόμβοι δεν είναι μοναδικά προσδιορισμένοι. Τα άλλα ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιούν συνήθως επικοινωνία point-to-point, δεδομένου ότι η πηγή ξέρει πώς να φθάσει στον προορισμό.

- **Περιορισμοί των πόρων των κόμβων:** Οι περιορισμοί πόρων των κόμβων σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων αφορούν τους περιορισμένους πόρους ενέργειας και εύρους ζώνης. Οι ενεργειακοί πόροι των κόμβων δεν μπορούν να αντικατασταθούν, ενώ οι κόμβοι άλλων ασύρματων δικτύων έχουν τις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Ο περιορισμένος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων μέχρι μερικών kilobits ανά δευτερόλεπτο σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων είναι μικρός σε σχέση με αυτό των άλλων ασύρματων δικτύων που κυμαίνεται από ένα έως μερικά εκατοντάδες megabits ανά δευτερόλεπτο. Επιπλέον περιορισμοί υπάρχουν και στην μνήμη και στην επεξεργαστική ισχύ που υποστηρίζει ο κόμβος ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Υπάρχουν κόμβοι με μνήμη των μερικών kilobytes και με επεξεργαστή των 4MHz, ενώ οι κόμβοι άλλων ασύρματων δικτύων μπορούν να έχουν μνήμη των gigabytes και επεξεργαστή των GHz.
- **Προσδιορισμός (ταυτότητα) των κόμβων:** Ο προσδιορισμός των κόμβων με τη βοήθεια μοναδικών καθολικών προσδιοριστικών δεν είναι δυνατός στο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, λόγω του πολύ μεγάλου αριθμού κόμβων στο δίκτυο και των εξόδων που συνεπάγεται η απόκτηση ενός μοναδικού προσδιοριστικού για κάθε κόμβο. Σε άλλα ασύρματα δίκτυα οι κόμβοι έχουν μοναδικά προσδιοριστικά, όπως IP διευθύνσεις.

1.3 Εφαρμογές

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων προσφέρουν ένα μεγάλο αριθμό δυνατοτήτων σε διάφορες ιδιωτικές και στρατιωτικές εφαρμογές, όπως:

- Στρατιωτικά δίκτυα αισθητήρων για να ερευνώνται, να εντοπίζονται και να αποκτώνται όσο τον δυνατόν περισσότερες πληροφορίες σχετικά με εχθρικές κινήσεις και άλλα ενδιαφέροντα φαινόμενα.
- Δίκτυα αισθητήρων για να ερευνώνται και να παρακολουθούνται ωκεανοί, δάση κλπ.
- Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων παρακολούθησης για την παροχή ασφάλειας σε διάφορες εγκαταστάσεις π.χ. εμπορικά κέντρα, χώρους στάθμευσης.
- Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων κίνησης για να παρακολουθείται η κυκλοφορία των οχημάτων σε εθνικές οδούς και σημεία συμφόρησης εντός των πόλεων.
- Δίκτυα για την εξυπηρέτηση συνέδρων σε συνεδριακά κέντρα.

Η χρήση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι ένα αξιόλογο εργαλείο παρατήρησης διαδικασιών που αφορούν τον πραγματικό κόσμο. Οι προϋποθέσεις για την επιλογή αυτού του εργαλείου είναι:

- Το περιβάλλον παρατήρησης είναι πολύ σκληρό, απρόσιτο ή ακόμα και τοξικό.
- Το περιβάλλον παρατήρησης είναι επίπεδο και με δυσκολία μπορεί να παρατηρηθεί από μακριά.
- Οποιαδήποτε οργάνωση για την παρατήρηση πρέπει να διασφαλίζεται ότι δεν θα επηρεάσει τα αποτελέσματα παρατήρησης.
- Το φαινόμενο που ενδιαφέρει ή το κοντινό φυσικό περιβάλλον του μπορεί να οργανωθεί για παρατήρηση.
- Οι παραδοσιακές μέθοδοι παρατήρησης είναι πολύ δαπανηρές εξαιτίας της συμμετοχής του ανθρώπινου δυναμικού.
- Απαιτείται έλεγχος υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυσης.
- Η παρατήρηση πρέπει να εκτελείται συνεχώς κατά τη διάρκεια εκτεταμένων χρονικών περιόδων ή σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές.
- Η αναλογία σήματος προς το θόρυβο των σημάτων που εκπέμπονται από το φαινόμενο που ενδιαφέρει είναι χαμηλή ή μειώνεται σημαντικά με την απόσταση.

1.3.1 Στρατιωτικές εφαρμογές

Οι στρατιωτικές υπηρεσίες και οι αντιπροσωπείες που τις χρηματοδοτούν είναι μια από τις κύριες κατευθυντήριες δυνάμεις πίσω από την έρευνα στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.[1]

Εντοπισμός οχημάτων: Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων χρησιμοποιείται για να εντοπίσει την πορεία των στρατιωτικών οχημάτων (π.χ. άρματα). Το δίκτυο αισθητήρων πρέπει να είναι απαρατήρητο και δύσκολο να καταστραφεί. Τα αποτελέσματα εντοπισμού πρέπει να αναφερθούν εντός των δεδομένων προθεσμιών.

Οι κόμβοι αισθητήρων επεκτείνονται από ένα τηλεκατευθυνόμενο εναέριο όχημα (UAV). Οι αισθητήρες μαγνητομέτρων είναι συνδεδεμένοι με τους κόμβους προκειμένου να ανιχνευθεί η εγγύτητα των αρμάτων. Οι κόμβοι συνεργάζονται στον υπολογισμό της πορείας και της ταχύτητας ενός οχήματος υπό παρακολούθηση. Τα αποτελέσματα εντοπισμού διαβιβάζονται στο τηλεκατευθυνόμενο εναέριο όχημα.

Αυτοθεραπευόμενο ναρκοπέδιο: Οι αντιαρματικές νάρκες ξηράς εξοπλίζονται με ικανότητες αντίληψης και επικοινωνίας ώστε να εξασφαλιστεί ότι μια συγκεκριμένη περιοχή παραμένει καλυμμένη ακόμα κι αν ο εχθρός πειράζει το ναρκοπέδιο για να δημιουργήσει μια πιθανή γραμμή παραβίασης. Εάν αυτό ανιχνευθεί από το δίκτυο, μια άθικτη νάρκη από την παραβίαση ενεργοποιεί έναν προωθητή πυραύλων. Τα ναρκοπέδια διαμορφώνουν ένα multi-hop ad-hoc δίκτυο και ελέγχουν την ποιότητα σύνδεσης για να ανιχνεύσουν τις χαμένες νάρκες. Οι κόμβοι υπολογίζουν επίσης τη θέση και τον προσανατολισμό τους χρησιμοποιώντας υπερήχους.

1.3.2 Παρακολούθηση ειδών

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παρατηρήσουν τη συμπεριφορά των ζώων στους φυσικούς βιότοπούς τους.[1]

Παρατήρηση πουλιών στο Great Duck Island: Ένα WSN χρησιμοποιείται για να παρατηρήσει τη συμπεριφορά αναπαραγωγής ενός μικρού πουλιού αποκαλούμενου Leach's Storm Petrel στο Great Duck Island, στο Maine στις ΗΠΑ. Αυτά τα πουλιά ενοχλούνται εύκολα από την παρουσία ανθρώπων, ως εκ τούτου τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων φαίνεται να είναι πιο κατάλληλος τρόπος για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς τους. Η εποχή αναπαραγωγής διαρκεί επτά μήνες από τον Απρίλιο μέχρι τον Οκτώβριο. Οι βιολόγοι ενδιαφέρονται για τις αλλαγές στις περιβαλλοντικές συνθήκες έξω από και μέσα στις φωλιές κατά τη διάρκεια της εποχής αναπαραγωγής, τις παραλλαγές μεταξύ των περιοχών αναπαραγωγής, και τις παραμέτρους των προτιμώμενων περιοχών αναπαραγωγής.

Οι κόμβοι αισθητήρων εγκαθίστανται μέσα στα λαγούμια και στην επιφάνεια. Οι κόμβοι μπορούν να μετρήσουν την υγρασία, την πίεση, τη θερμοκρασία, και το περιβαλλοντικό ελαφρύ φως. Οι κόμβοι είναι εξοπλισμένοι με υπέρυθρους αισθητήρες για να ανιχνεύσουν την παρουσία των πουλιών. Οι κόμβοι αισθητήρων διαμορφώνουν ένα ad-hoc δίκτυο. Κάθε cluster του δικτύου περιέχει έναν κόμβο αισθητήρων με μια μεγάλης ακτίνας κατευθυντική κεραία που συνδέει το cluster με έναν κεντρικό υπολογιστή στο σταθμό βάσης. Ο υπολογιστής αυτός συνδέεται με ένα σύστημα βάσης δεδομένων μέσω μιας δορυφορικής σύνδεσης. Οι αισθητήριοι κόμβοι δειγματοληπτούν περίπου μια φορά το λεπτό και στέλνουν τις μετρήσεις τους άμεσα στο σύστημα της βάσης δεδομένων.

Zebra Net: Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων χρησιμοποιείται για να παρατηρήσει τη συμπεριφορά των άγριων ζώων μέσα σε έναν ευρύχωρο βιότοπο (π.χ. άγρια άλογα, ζέβρες και λιοντάρια) στο ερευνητικό κέντρο Mpala στην Κένυα. Ιδιαίτερου ενδιαφέροντος είναι η συμπεριφορά των μεμονωμένων ζώων (π.χ. δραστηριότητα της βοσκής, μετακίνηση για εύρεση βοσκής, γρήγορη κίνηση), των αλληλεπιδράσεων μέσα σε ένα είδος, των αλληλεπιδράσεων μεταξύ διαφορετικών ειδών (π.χ., συμπεριφορά κοπαδιού και δομή του κοπαδιού), και του αντίκτυπου της ανθρώπινης παρουσίας στα είδη. Η περίοδος παρατήρησης σχεδιάζεται για να διαρκέσει ένα έτος ή περισσότερα. Η περιοχή παρατήρησης μπορεί να είναι τόσο μεγάλη όσο εκατοντάδες ή ακόμα και χιλιάδες τετραγωνικά χιλιόμετρα. Τα ζώα είναι εξοπλισμένα με κόμβους αισθητήρων. Ένας ενσωματωμένος δέκτης GPS χρησιμοποιείται για να λαμβάνει τις εκτιμήσεις της θέσης τους και την ταχύτητα της μετακίνησης. Αισθητήρες φωτός χρησιμοποιούνται για να δώσουν μια ένδειξη του υπάρχοντος περιβάλλοντος. Άλλοι περαιτέρω αισθητήρες (μέτρησης θερμοκρασίας σωμάτων ή περιβαλλοντικής θερμοκρασίας) προγραμματίζονται για το μέλλον. Κάθε κόμβος καταγράφει τις ενδείξεις από τους αισθητήρες του κάθε τρία λεπτά. Όταν ένας κόμβος «μπαίνει» στο εύρος επικοινωνίας ενός άλλου κόμβου, οι ενδείξεις και οι ταυτότητες των κόμβων ανταλλάσσονται (δηλ., το δεδομένο μεταδίδεται σε όλα τα τμήματα του δικτύου). Σε τακτά χρονικά διαστήματα ένας κινητός σταθμός βάσης (π.χ., ένα αυτοκίνητο ή ένα αεροπλάνο) κινείται μέσα στην περιοχή παρατήρησης και συλλέγει τα καταγεγραμμένα στοιχεία από το ζώο που περνά.

1.3.3 Παρακολούθηση περιβάλλοντος

Εκτός από τα ζώα και διάφορα άλλα περιβαλλοντικά φαινόμενα μπορούν να παρατηρηθούν με τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.[1]

Βαθυμετρία: Ένα δίκτυο αισθητήρων χρησιμοποιείται για να ελέγξει τον αντίκτυπο στο περιβάλλον ενός αιολικού πάρκου σε μια ακτή της Αγγλίας. Το ιδιαίτερο ενδιαφέρον εδώ είναι η επιρροή στη δομή της ωκεάνιας λεκάνης και η επιρροή στην παλιρροιακή δραστηριότητα. Οι κόμβοι αισθητήρων επεκτείνονται με ρίψη τους από σκάφος σε επιλεγμένες θέσεις. Κάθε κόμβος αισθητήρων συνδέεται μέσω ενός καλωδίου με έναν σημαντήρα στην ωκεάνια επιφάνεια που περιέχει το ραδιοπομπό και το GPS, δεδομένου ότι η ραδιοεπικοινωνία κάτω από το νερό είναι ουσιαστικά αδύνατη. Οι κόμβοι αισθητήρων είναι

σε θέση να μετρήσουν την πίεση, τη θερμοκρασία, την αγωγιμότητα, το ρεύμα και τη θολούρα, και να διαμορφώσουν ένα αυτοοργανωμένο ad-hoc δίκτυο.

Ωκεάνιος έλεγχος υδάτων: Το πρόγραμμα ARGO χρησιμοποιεί ένα δίκτυο αισθητήρων για να παρατηρήσει τη θερμοκρασία, την αλμυρότητα, και την τρέχουσα κατάσταση του ανώτερου ωκεανού. Ο στόχος είναι μια ποσοτική περιγραφή της κατάστασης του ανώτερου ωκεανού και των σχεδίων της ωκεάνιας μεταβλητότητας κλίματος, συμπεριλαμβανομένης της θερμότητας, της αποθήκευσης και μεταφοράς του γλυκού νερού. Η προοριζόμενη κάλυψη είναι παγκόσμια, και η παρατήρηση προγραμματίζεται να διαρκέσει για αρκετά έτη. Τα στοιχεία μέτρησης είναι διαθέσιμα σχεδόν σε πραγματικό χρόνο. Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί αισθητήρες ελεύθερης μετατόπισης με δυνατότητες μέτρησης θερμοκρασίας και αλμυρότητας. Οι κόμβοι ρίπτονται από σκάφη ή από αεροπλάνα. Οι κόμβοι περνούν έναν κύκλο σε βάθος 2000m κάθε δέκα ημέρες. Τα στοιχεία που συλλέγονται κατά τη διάρκεια αυτών των κύκλων διαβιβάζονται σε έναν δορυφόρο ενώ οι κόμβοι είναι στην επιφάνεια. Η διάρκεια ζωής των κόμβων είναι περίπου 4-5 έτη.

1.3.4 Εφαρμογές υγείας

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παρατηρήσουν την κατάσταση της υγείας των ανθρώπων.[1]

Παρακολούθηση ενδείξεων ζωτικής σημασίας: Οι ασύρματοι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για να παρακολουθούν τις ζωτικής σημασίας ενδείξεις των ασθενών σε νοσοκομειακό περιβάλλον. Σε αντίθεση με τις συμβατικές προσεγγίσεις, οι λύσεις οι βασισμένες στους ασύρματους αισθητήρες προορίζονται να βελτιώσουν την ακρίβεια ελέγχου ενώ επίσης είναι καταλληλότερες για τους ασθενείς.

Το σύστημα αποτελείται από τέσσερα μέρη: ένα αναγνωριστικό του ασθενούς, ιατρικούς αισθητήρες, μια συσκευή απεικόνισης και μια γραφίδα. Το αναγνωριστικό του ασθενούς είναι ένας ειδικός αισθητήριος κόμβος που περιέχει στοιχεία του ασθενούς (π.χ., όνομα), ο οποίος αισθητήρας συνδέεται στον ασθενή όταν εισέρχεται στο νοσοκομείο. Διάφοροι ιατρικοί αισθητήρες (π.χ., ηλεκτροκαρδιογράφημα) μπορούν να συνδεθούν στη συνέχεια με τον ασθενή. Τα στοιχεία ασθενών και οι ζωτικής σημασίας ενδείξεις μπορούν να επιθεωρηθούν χρησιμοποιώντας μια συσκευή απεικόνισης. Η γραφίδα φέρεται από το ιατρικό προσωπικό για να εγκαταστήσει και να αφαιρέσει τους συνδέσμους μεταξύ των

διάφορων συσκευών. Η γραφίδα εκπέμπει μια μοναδική ταυτότητα μέσω των υπέρυθρων ακτίνων για να περιορίσει την εμβέλεια σε έναν μόνο ασθενή.

1.3.5 Οικιακές εφαρμογές

Τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν επίσης να βελτιώσουν την ευκολία στο περιβάλλον των σπιτιών.[1]

Συναρμολόγηση επίπλων: Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων χρησιμοποιείται για να βοηθήσει τους ανθρώπους κατά τη διάρκεια της συναρμολόγησης σύνθετων αντικειμένων, όπως έπιπλα που πρέπει να συναρμολογήσεις μόνος σου]. Αυτό απαλλάσσει τους χρήστες από το να μελετήσουν και να καταλάβουν τα σύνθετα εγχειρίδια οδηγιών, και τους αποτρέπει από το να κάνουν λάθος. Τα μέρη και τα εργαλεία των επίπλων είναι εξοπλισμένα με τους αισθητήριους κόμβους. Αυτοί οι κόμβοι έχουν ποικίλους διαφορετικούς αισθητήρες: αισθητήρες δύναμης (για τις ενώσεις), γυροσκόπιο (για τα κατσαβίδια), και επιταχυνσιόμετρα (για τα σφυριά). Οι κόμβοι διαμορφώνουν ένα ad-hoc δίκτυο για να ανιχνεύουν ορισμένες ενέργειες και σχετικές ακολουθίες και δίνουν την οπτική ανατροφοδότηση στο χρήστη μέσω LEDs που είναι ενσωματωμένα στα μέρη των επίπλων.

1.3.6 Γεωργία

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να αυξήσουν την αποδοτικότητα του εδάφους αναπαραγωγής φυτών και της αγροτικής οικονομίας ζωικού κεφαλαίου.[1]

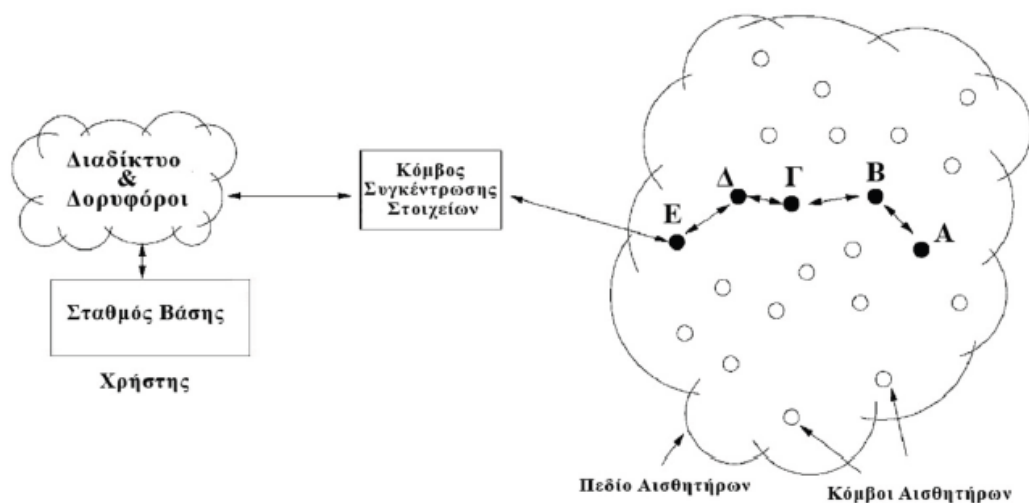
Έλεγχος σταφυλιών: Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων χρησιμοποιείται για να ελέγξει τους παράγοντες που επηρεάζουν την αύξηση φυτών (π.χ., θερμοκρασία, υγρασία εδάφους, και φως) κατά μήκος ενός μεγάλου αμπελώνα στο Όρεγκον, στις Η.Π.Α.. Οι στόχοι περιλαμβάνουν την ακρίβεια συγκομιδής (συγκομιδή μιας περιοχής μόλις τα σταφύλια σε αυτήν είναι ώριμα), την φροντίδα των φυτών (προσαρμόζοντας τον ανεφοδιασμό ύδατος, λιπάσματος, φυτοφαρμάκων στις ανάγκες των μεμονωμένων φυτών), την προστασία από παγετό, την πρόβλεψη εμφάνισης εντόμων, ζιζανίων ή και μυκήτων, αναπτύσσοντας έτσι

νέα γεωργικά πρότυπα. Σε μια πρώτη έκδοση του συστήματος, οι κόμβοι αισθητήρων επεκτείνονται σε έναν αμπελώνα σε ένα κανονικό πλέγμα ανά 20m. Ένας αισθητήρας θερμοκρασίας συνδέεται με κάθε κόμβο αισθητήρων προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι ψεύτικες μετρήσεις λόγω της θερμότητας που διαδίδεται από τους κόμβους αισθητήρων. Ένας φορητός υπολογιστής συνδέεται με το δίκτυο αισθητήρων μέσω μιας πύλης για να δείχνει και καταγράφει τη κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος του αμπελώνα.

Κεφάλαιο 2ο – Αρχιτεκτονική Δικτύου Αισθητήρων

2.1 Αρχιτεκτονική Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από έναν μεγάλο αριθμό αισθητήρων καταναμημένων ομοιόμορφα σε μια περιορισμένη γεωγραφική περιοχή. Τα σημαντικότερα συστατικά ενός χαρακτηριστικού δικτύου αισθητήρων παρουσιάζονται στην **Εικόνα 2** και είναι: οι κόμβοι αισθητήρων (sensor nodes), το πεδίο αισθητήρων (sensor field), ο κόμβος συγκέντρωσης στοιχείων (sink) και ο διαχειριστής εργασιών (task manager ή base station).



Εικόνα 2: Δομή επικοινωνίας δικτύων αισθητήρων [Akyildiz et al., 5].

Το πεδίο αισθητήρων μπορεί να θεωρηθεί ως ένα πεδίο μέσα στο οποίο οι κόμβοι τοποθετούνται, δηλαδή η περιοχή στην οποία περιμένουμε να εμφανιστεί το φαινόμενο που μας ενδιαφέρει.

Οι κόμβοι αισθητήρων είναι η καρδιά του δικτύου. Είναι υπεύθυνοι για τη συλλογή στοιχείων και την δρομολόγηση αυτών των πληροφοριών πίσω στο sink.

Ο sink είναι ένας κόμβος αισθητήρων που έχει ως στόχο την λήψη, την επεξεργασία και την αποθήκευση στοιχείων από τους άλλους κόμβους αισθητήρων. Χρησιμοποιεί ώστε να μειωθεί ο συνολικός αριθμός μηνυμάτων που πρέπει να σταλούν μεταξύ των κόμβων, έτσι ώστε να μειώνονται και οι γενικές ανάγκες σε ενέργεια του δικτύου. Τέτοια σημεία συνήθως ορίζονται δυναμικά από το δίκτυο. Οι κανονικοί κόμβοι μπορούν επίσης να θεωρηθούν ως sink, εάν καθυστερούν τα εξερχόμενα μηνύματα, έως ότου έχουν συγκεντρώσει αρκετές πληροφορίες. Γι' αυτόν τον λόγο οι sink είναι γνωστοί ως σημεία συγκέντρωσης στοιχείων.

Ο διαχειριστής εργασιών ή σταθμός βάσης είναι ένα κεντρικό σημείο ελέγχου μέσα στο δίκτυο, το οποίο εξάγει τις πληροφορίες από το δίκτυο και διαδίδει τις πληροφορίες πίσω στο δίκτυο. Επίσης, παρέχει μια πύλη (gateway) στα άλλα δίκτυα, έναν ισχυρό επεξεργαστή

δεδομένων, ένα κέντρο αποθήκευσης στοιχείων και ένα σημείο πρόσβασης για τους χρήστες. Ο σταθμός βάσης είναι είτε ένας φορητός υπολογιστής είτε ένας τερματικός σταθμός. Τα δεδομένα κατευθύνονται από τον sink προς αυτούς τους τερματικούς σταθμούς μέσω του Διαδικτύου, των ασύρματων καναλιών των δορυφόρων κλπ.

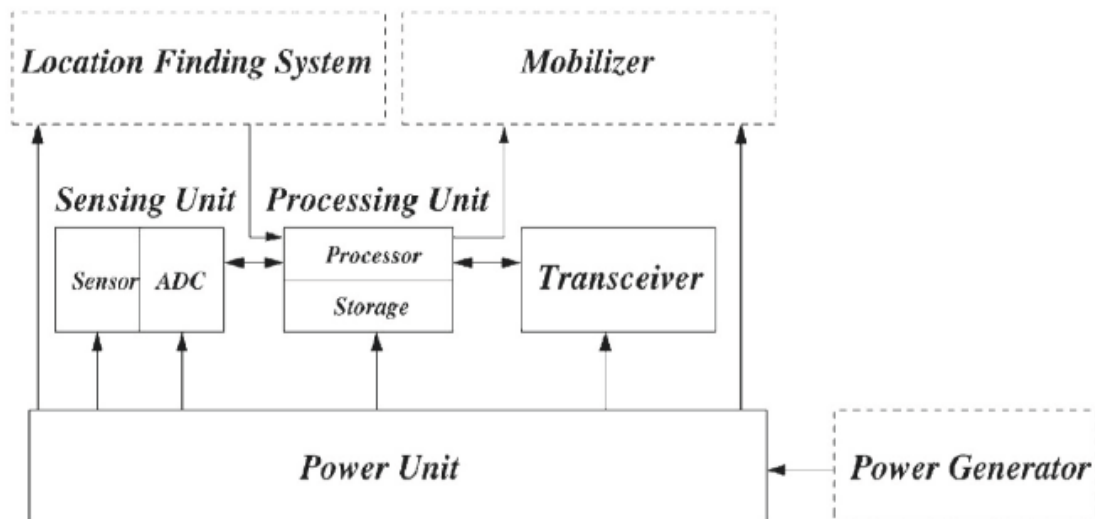
Έτσι, εκατοντάδες ή και χιλιάδες κόμβοι επεκτείνονται σε όλο το πεδίο αισθητήρων, για να δημιουργήσουν ένα ασύρματο multi-hop δίκτυο. Οι κόμβοι μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα ασύρματα μέσα επικοινωνίας όπως οι υπέρυθρες, ράδιο, οπτικά μέσα ή Bluetooth για τις επικοινωνίες τους. Η εμβέλεια μετάδοσης των κόμβων ποικίλλει ανάλογα με το πρωτόκολλο επικοινωνίας που χρησιμοποιείται.

Τέλος, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να περιγραφούν σε υψηλότερο επίπεδο σαν ένα συνδυασμό δύο διαφορετικών δικτύων:

- **Το δίκτυο απόκτησης δεδομένων:** Μια συλλογή από κόμβους αισθητήρων και του σταθμού βάσης. Τα δίκτυα αισθητήρων μετρούν τα φυσικά στοιχεία και ο σταθμός βάσης συλλέγει τις πληροφορίες από τους κόμβους και προωθεί στοιχεία ελέγχου στο περιβάλλον του δικτύου.
- **Το δίκτυο δεδομένων:** Διασυνδέει το δίκτυο απόκτησης δεδομένων σε έναν χρήστη και είναι μια συλλογή ενσύρματων και ασύρματων δικτύων.

2.2 Αρχιτεκτονική κόμβου

Οι κόμβοι αισθητήρων αποτελούνται συνήθως από τέσσερα βασικά στοιχεία, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 3**. Έναν αισθητήρα (Sensing Unit), μια μονάδα επεξεργασίας (Processing Unit), ένα ράδιο πομποδέκτη (Transceiver) και μια μονάδα παροχής ενέργειας (Power Unit). Τα πρόσθετα στοιχεία μπορούν να περιλαμβάνουν συστήματα όπως το GPS (Global Positioning System), το οποίο μπορεί να βρίσκει ανά πάσα στιγμή τη θέση του κόμβου, τα mobilizers τα οποία χρειάζονται για να μετακινηθεί ο κόμβος σε συγκεκριμένες εφαρμογές και τέλος οι γεννήτριες ενέργειας (Power Generator).

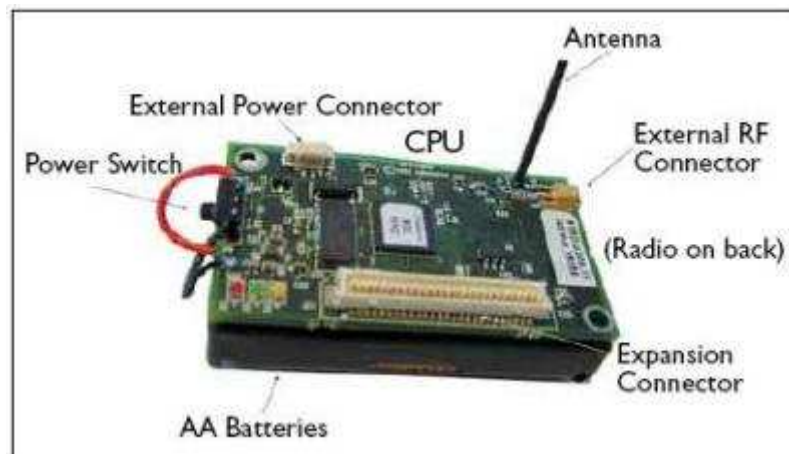


Εικόνα 3: Sensor Node Hardware components [Akyildiz et al., 5].

Παρακάτω δίνεται μια συνοπτική εξήγηση του τι κάνει καθένα από αυτά τα στοιχεία που έχει ένας κόμβος αισθητήρων. Τα αναλογικά σήματα τα οποία μετριοούνται από τους αισθητήρες ψηφιοποιούνται μέσω ADC (Analog to Digital Converter) και τροφοδοτούνται στη συνέχεια προς την μονάδα επεξεργασίας.

Η μονάδα επεξεργασίας διαχειρίζεται τις διαδικασίες που κάνουν τον κόμβο αισθητήρων να εκτελέσει τους ορισμένους στόχους της αντίληψης και της συνεργασίας. Ο ράδιο πομποδέκτης (radio transceiver) συνδέει τον κόμβο με το δίκτυο και χρησιμεύει ως το μέσο επικοινωνίας του κόμβου.

Η μονάδα παροχής ενέργειας (power unit) είναι το σημαντικότερο στοιχείο ενός κόμβου αισθητήρων, επειδή καθορίζει την διάρκεια ζωής ολόκληρου του δικτύου. Λόγω των περιορισμών μεγέθους οι μπαταρίες AA ή τα quartz cells χρησιμοποιούνται ως αρχικές πηγές ενέργειας. Για να έχουμε μια ένδειξη της κατανάλωσης ενέργειας, ένας μέσος κόμβος αισθητήρων θα χρησιμοποιήσει περίπου 4,8mA για να λάβει ένα μήνυμα, 12mA για να διαβιβάσει ένα πακέτο και 5mA για sleeping. Επιπλέον, η CPU χρησιμοποιεί κατά μέσο όρο 5,5mA, όταν το δίκτυο είναι ενεργό. Στην **Εικόνα 4** παρουσιάζεται ένας πραγματικός αισθητήρας και τα βασικά του χαρακτηριστικά.



Εικόνα 4: Ένας πραγματικός αισθητήρας

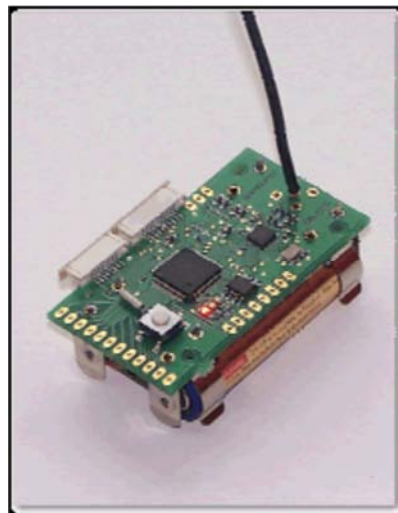
Η Crossbow και η Ambient Systems είναι δύο επιχειρήσεις που παράγουν κόμβους αισθητήρων για εμπορική χρήση [2,3]. Για να έχουμε μια ιδέα του περιορισμού των πόρων, ο **Πίνακας 2** παρουσιάζει λεπτομέρειες του καλύτερου σε πωλήσεις κόμβου της Crossbow, τον Mica (**Εικόνα 5**) και το κύριο προϊόν της Ambient Systems, τον μnode κόμβο (**Εικόνα 6**). Ο κόμβος Mica έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε όλες τις μελέτες στο Πανεπιστήμιο του Berkeley, σε μια προσπάθεια να αναπτυχθεί ένα λειτουργικό σύστημα για WSN το TinyOS. [4]

Πίνακας 2: Mica και μnode στοιχεία.

	MICAz	μNODE
Processor	4MHz 8bit Atmel	16MHz 16bit TI MSP430
Memory	4KB RAM, 512KB flash	10KB RAM, 1MB flash
Radio	916MHz, 40Kbps, 35m range	868/917MHz, 50m range



Εικόνα 5: Κόμβος Mica της Xbow



Εικόνα 6: Κόμβος μNode της Ambient Systems

Οι περισσότερες από τις τεχνικές δρομολόγησης και οι εφαρμογές παρακολούθησης των δικτύων αισθητήρων απαιτούν την γνώση της θέσης με μεγάλη συνήθως ακρίβεια. Έτσι, είναι συνηθισμένο για ένα αισθητήριο κόμβο να έχει προσαρτημένη και μια μονάδα εύρεσης θέσης (GPS). Μια μονάδα κίνησης (mobilizers) είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί όταν απαιτείται να κινηθούν οι αισθητήριοι κόμβοι προκειμένου να παρακολουθήσουν καλύτερα το παρατηρούμενο φαινόμενο.

2.3 Σχεδιαστικοί παράγοντες

Ο σχεδιασμός ενός δικτύου αισθητήρων επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Παρακάτω αναφέρονται μερικοί από αυτούς. Η μελέτη αυτών των παραγόντων (που πρέπει ή δεν πρέπει να διαθέτουν τα δίκτυα αισθητήρων και οι κόμβοι) είναι πρωταρχικής σημασίας, γιατί παρέχουν τις κατευθύνσεις γύρω από τις οποίες πρέπει να σχεδιαστεί ένα πρωτόκολλο ή ένας αλγόριθμος για δίκτυα αισθητήρων. [5]

2.3.1 Ανοχή σε λάθη (Fault tolerance)

Κάποιοι κόμβοι αισθητήρων είναι δυνατόν να αποτύχουν ή να μπλοκάρουν εξαιτίας της έλλειψης ενέργειας ή μιας φυσικής ζημιάς, ή εξαιτίας περιβαλλοντολογικών παρεμβολών. Η αποτυχία ή η καταστροφή (παροδική ή μόνιμη) μερικών κόμβων δεν θα πρέπει να επηρεάζει τον συνολικό σκοπό του δικτύου των αισθητήρων. Αυτό το θέμα αναφέρεται ως αξιοπιστία ή ανοχή σε σφάλματα. Η ανοχή σε σφάλματα είναι η δυνατότητα του δικτύου αισθητήρων να διατηρεί τη λειτουργικότητά του χωρίς διακοπές που να οφείλονται στις αποτυχίες των κόμβων του. Η αξιοπιστία ή η ανοχή σε σφάλματα ενός κόμβου συμβολίζεται με $R_k(t)$ και μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας τη διασπορά Poisson προκειμένου να δείξει την πιθανότητα να μην έχουμε κάποια αποτυχία σε ένα χρονικό διάστημα $(0,t)$:

$$R_k(t) = \exp(-\lambda_k t) \quad (2.1)$$

όπου λ_k και t είναι αντίστοιχα ο ρυθμός αποτυχίας ενός κόμβου k και η χρονική περίοδος.

Οι αλγόριθμοι και τα πρωτόκολλα μπορούν να σχεδιαστούν, ώστε να εμπεριέχουν τα επίπεδα ανοχής σε λάθη που απαιτούνται από τα δίκτυα αισθητήρων. Αν το περιβάλλον στο οποίο πρόκειται να αναπτυχθεί ένα δίκτυο αισθητήρων δημιουργεί μικρές παρεμβολές, τότε τα πρωτόκολλα μπορούν ανάλογα να είναι πιο ελαστικά. Για παράδειγμα, αν ένα δίκτυο αισθητήρων βρίσκεται εγκατεστημένο σε μια οικία προκειμένου να παρακολουθεί τα επίπεδα υγρασίας και θερμοκρασίας, η ανοχή σε σφάλματα μπορεί να είναι χαμηλή, αφού τέτοιου είδους κόμβοι δεν καταστρέφονται και δεν παρεμβάλλονται εύκολα από το περιβάλλον. Αντιθέτως, σε ένα πεδίο μάχης το δίκτυο αισθητήρων που θα εγκατασταθεί πρέπει να έχει μεγάλη ανοχή σε σφάλματα, διότι είναι πολύ εύκολο να καταστραφούν αρκετοί κόμβοι του από εχθρικές επιχειρήσεις. Από τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι η ανοχή σε σφάλματα εξαρτάται και από την εφαρμογή για την οποία προορίζεται το δίκτυο. Συνεπώς, αυτό πρέπει

να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό του δικτύου αισθητήρων, αλλά και των ίδιων των κόμβων.

2.3.2 Επεκτασιμότητα (Scalability)

Ο αριθμός των κόμβων αισθητήρων που έχουν αναπτυχθεί για την μελέτη ενός φαινομένου μπορεί να είναι της τάξης των εκατοντάδων ή χιλιάδων. Ανάλογα με την εφαρμογή, ο αριθμός αυτός μπορεί να φτάσει και την ακραία τιμή των εκατομμυρίων. Ότι πρωτόκολλο σχεδιαστεί θα πρέπει να μπορεί να χειριστεί αυτόν τον αριθμό των κόμβων. Πρέπει επίσης να χρησιμοποιήσουν την υψηλή πυκνότητα με την οποία εγκαθίστανται οι κόμβοι αισθητήρων. Η πυκνότητα μπορεί να διαφέρει από μερικούς μέχρι εκατοντάδες κόμβους σε μια περιοχή η οποία μπορεί να είναι μικρότερη σε διάμετρο από 10m . Η πυκνότητα μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με το:

$$\mu(R) = \frac{(N\pi R^2)}{(A)} \quad (2.2)$$

όπου N είναι ο αριθμός των διασπαρμένων κόμβων σε μια περιοχή A και R η εμβέλεια της ασύρματης μετάδοσης. Βασικά το $\mu(R)$ δίνει τον αριθμό των κόμβων μέσα στην εμβέλεια της ασύρματης μετάδοσης του κάθε κόμβου που ανήκει στην περιοχή A .

Επιπλέον, ο αριθμός των κόμβων σε μια περιοχή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δείξει την πυκνότητα των κόμβων. Η πυκνότητα αυτή εξαρτάται από την εφαρμογή για την οποία εγκαταστάθηκαν οι κόμβοι αισθητήρων. Για την παρακολούθηση μηχανημάτων, η πυκνότητα των κόμβων αισθητήρων είναι περίπου 300 για μια περιοχή $5m^2$ και η πυκνότητα για παρακολούθηση οχημάτων είναι περίπου 10 κόμβοι ανά περιοχή. Γενικά η πυκνότητα μπορεί να φτάνει μέχρι και 20 κόμβους αισθητήρων ανά m^3 . Ένα σπίτι μπορεί να περιέχει περίπου δύο 12αδες οικιακών συσκευών που να περιέχουν κόμβους αισθητήρων, αλλά αυτός ο αριθμός θα μεγαλώσει αν οι κόμβοι εμφυτεύονται στην επίπλωση και σε άλλα μικροαντικείμενα. Για εφαρμογές παρακολούθησης οικιών, ο αριθμός των κόμβων κυμαίνεται από 25 ως 100 ανά περιοχή. Η πυκνότητα μπορεί να είναι εξαιρετικά υψηλή όταν ένα άτομο κάθεται σε ένα στάδιο μαζί με άλλους και ο κάθε ένας από αυτούς φέρει αισθητήρες στα ρούχα του, τα παπούτσια του και τα άλλα προσωπικά αντικείμενα που θα κουβαλάει μαζί του (ρολόι, γυαλιά, δαχτυλίδια, μπρελόκ κλπ.)

2.3.3 Κόστος Παραγωγής (Production Cost)

Αφού τα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από ένα μεγάλο αριθμό κόμβων αισθητήρων, το κόστος ενός μόνο κόμβου είναι πολύ σημαντικό για ένα τέτοιο δίκτυο. Αν το κόστος του δικτύου είναι πιο ακριβό από το να εγκατασταθούν οι παραδοσιακοί αισθητήρες, τότε τα δίκτυα αισθητήρων δεν θα συμφέρουν οικονομικά. Αποτέλεσμα του παραπάνω είναι ότι το κόστος του κάθε κόμβου πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο.

2.3.4 Τοπολογία (Sensor Network Topology)

Ένας μεγάλος αριθμός μη προσβάσιμων και χωρίς παρακολούθηση κόμβων αισθητήρων, οι οποίοι εύκολα μπορούν να χαλάσουν, κάνει την διατήρηση της τοπολογίας του δικτύου μια μεγάλη πρόκληση. Η πυκνότητα μπορεί να φθάνει και τους 20 κόμβους/m³, κάτι που δυσκολεύει ακόμα περισσότερο την διαχείριση της τοπολογίας. Μπορούμε να εξετάσουμε την διατήρηση της τοπολογίας του δικτύου αισθητήρων σε 3 φάσεις.

- **Φάση πριν την εγκατάσταση και φάση εγκατάστασης:** Οι κόμβοι αισθητήρων μπορούν είτε να διασπαρθούν μαζικά είτε να τοποθετηθούν ένας-ένας στο χώρο. Μπορούν να εγκατασταθούν με τους εξής τρόπους :

- Να πεταχτούν από ένα αεροπλάνο
- Να βρίσκονται σε ένα βλήμα πυροβολικού (ή πύραυλο) το οποίο εκρήγνυται και τους διασπείρει στην περιοχή.
- Να ριφθούν με ένα καταπέλτη π.χ. από το κατάστρωμα ενός πλοίου.
- Να τοποθετηθούν ένας – ένας από ένα άνθρωπο ή ένα ρομπότ.

Αν και ο μεγάλος αριθμός των αισθητήρων καθώς και η χωρίς παρακολούθηση εγκατάστασή τους συνήθως περιλαμβάνει την τοποθέτησή τους σύμφωνα με ένα προσεχτικά μελετημένο σχέδιο, η αρχική εγκατάσταση πρέπει να πληροί κάποια κριτήρια :

- Μείωση του κόστους εγκατάστασης.
- Εξαφάνιση της ανάγκης για οποιαδήποτε προ-οργάνωση ή προ-σχεδιασμό.
- Αύξηση της ευελιξίας τοποθέτησης.
- Προώθηση της αυτό-οργάνωσης και της ανοχής σε σφάλματα.

- **Φάση μετά την εγκατάσταση:** Μετά την εξάπλωση, οι αλλαγές στην τοπολογία οφείλονται σε αλλαγές στους κόμβους αισθητήρων όπως:

- Θέση.
- Δυνατότητα επικοινωνίας.

- ο Διαθέσιμη ενέργεια.
- ο Δυσλειτουργία.
- ο Λεπτομέρειες στο σκοπό για τον οποίο εγκαταστάθηκαν.

Οι κόμβοι αισθητήρων μπορούν να εγκατασταθούν και στατικά. Οι αποτυχίες είναι ένα συνηθισμένο φαινόμενο λόγω έλλειψης ενέργειας ή καταστροφής. Είναι επίσης πιθανό να έχουμε δίκτυα αισθητήρων των οποίων οι κόμβοι συνεχώς κινούνται. Εκτός από τα προβλήματα τα οποία είναι φυσικό να αντιμετωπίζουν εξαιτίας των χαρακτηριστικών τους είναι δυνατόν ακόμα να έχουμε και δολιοφθορές. Αποτέλεσμα όλων των παραπάνω είναι οι τοπολογίες των δικτύων αισθητήρων να υπόκεινται σε συχνές αλλαγές.

- **Φάση εγκατάστασης επιπλέον κόμβων:** Επιπλέον κόμβοι είναι δυνατόν να εγκατασταθούν οποιαδήποτε χρονική στιγμή για να αντικαταστήσουν τους κόμβους που παρουσιάζουν δυσλειτουργίες ή λόγω αλλαγών στον αρχικό σκοπό για τον οποίο εγκαταστάθηκαν. Η πρόσθεση νέων κόμβων στο δίκτυο δημιουργεί την ανάγκη για επαναδιοργάνωση. Προκειμένου να αντιμετωπίσουμε τις συχνές αλλαγές στην τοπολογία ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, το οποίο αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό κόμβων με μεγάλους περιορισμούς στην κατανάλωση ενέργειας χρειαζόμαστε ειδικά σχεδιασμένα πρωτόκολλα δρομολόγησης.

2.3.5 Περιβάλλον (Environment)

Οι κόμβοι αισθητήρων εγκαθίστανται πυκνά είτε πολύ κοντά είτε κατευθείαν μέσα στο παρατηρούμενο φαινόμενο. Έτσι, συνήθως εργάζονται χωρίς παρακολούθηση σε απομακρυσμένες γεωγραφικές περιοχές. Είναι δυνατόν να εργάζονται :

- Στο εσωτερικό ενός μεγάλου μηχανήματος.
- Στα βάθη του ωκεανού.
- Μέσα σε ένα κυκλώνα.
- Στην επιφάνεια ενός ωκεανού στην διάρκεια μια καταιγίδας.
- Σε μια περιοχή μολυσμένη από ραδιενέργεια ή χημικές ουσίες.
- Στο πεδίο της μάχης πίσω από τις γραμμές του εχθρού.
- Σε ένα σπίτι ή σε ένα μεγάλο κτίριο.
- Σε μια μεγάλη αποθήκη.
- Εμφυτευμένοι σε ζώα.
- Ενσωματωμένοι σε ταχέως κινούμενα οχήματα.

- Στα νερά ενός ποταμού.

Η παραπάνω λίστα εφαρμογών μας δίνει μια ιδέα για τις συνθήκες κάτω από τις οποίες λειτουργούν οι κόμβοι αισθητήρων. Λειτουργούν σε συνθήκες υψηλής πίεσης στα βάθη ενός ωκεανού, στο σκληρό περιβάλλον ενός πεδίου μάχης, σε συνθήκες υψηλών ή χαμηλών θερμοκρασιών, όπως η μύτη ενός αεροσκάφους ή σε συνθήκες υψηλού περιβαλλοντολογικού θορύβου.

2.3.6 Μέσα μετάδοσης (Transmission Media)

Σε ένα δίκτυο αισθητήρων, οι επικοινωνούντες κόμβοι συνδέονται ασύρματα. Αυτές οι ζεύξεις μπορούν να υλοποιηθούν από ραδιοσυχνότητες, υπέρυθρα ή οπτικά μέσα. Προκειμένου να έχουμε λειτουργία σε παγκόσμιο επίπεδο πρέπει να διαλέξουμε ένα μέσο το οποίο θα είναι διαθέσιμο παντού στον κόσμο. Μια επιλογή για ασύρματες ζεύξεις είναι η χρήση της Βιομηχανικής, Επιστημονικής και Ιατρικής Μπάντας (Industrial Scientific Medical ISM Band), η οποία προσφέρεται χωρίς άδεια χρήσης στις περισσότερες χώρες. Κάποιες από αυτές τις συχνότητες χρησιμοποιούνται ήδη για επικοινωνία σε ασύρματα τηλέφωνα ή τοπικά ασύρματα δίκτυα (WLANs).

Το κύριο πλεονέκτημα χρήσης των συχνοτήτων ISM είναι η δωρεάν χρήση, το τεράστιο φάσμα και η παγκόσμια διαθεσιμότητα. Δεν περιορίζονται από κάποιο συγκεκριμένο πρότυπο και έτσι δίνουν μεγαλύτερη ελευθερία στην υλοποίηση τεχνικών που θα εξοικονομούν ενέργεια στα δίκτυα ασύρματων αισθητήρων. Από την άλλη μεριά υπάρχουν διάφοροι κανόνες και περιορισμοί, όπως της ενέργειας και των παρεμβολών από ήδη υπάρχουσες εφαρμογές. Οι περισσότερες διαθέσιμες εφαρμογές για δίκτυα αισθητήρων βασίζονται στην επικοινωνία με ραδιοσυχνότητες.

Ένα άλλος πιθανός τρόπος επικοινωνίας είναι μέσω υπερύθρων. Η επικοινωνία μέσω υπερύθρων μπορεί να γίνει χωρίς άδεια χρήσης και είναι ανθεκτική στις παρεμβολές από ηλεκτρικές συσκευές. Οι πομποδέκτες υπερύθρων είναι φθηνότεροι και ευκολότεροι να κατασκευαστούν. Πολλές από τις σημερινές συσκευές όπως τηλέφωνα, υπολογιστές κατασκευάζονται έχοντας ενσωματωμένο ένα πομποδέκτη υπερύθρων. Το μόνο μειονέκτημα τους είναι η απαίτηση για οπτική επαφή μεταξύ των επικοινωνούντων συσκευών. Το τελευταίο κάνει αποτρεπτική την επιλογή για χρήση υπερύθρων σαν μέσο μετάδοσης σε δίκτυα ασύρματων αισθητήρων.

Μια ενδιαφέρουσα λύση είναι αυτή του αισθητήρα «έξυπνης σκόνης» (smart dust), ο οποίος είναι ένα αυτόνομο σύστημα αισθήσεως και επεξεργασίας που χρησιμοποιεί οπτικό μέσο μετάδοσης. Υπάρχουν δύο επιλογές για οπτική μετάδοση μια παθητική και μια

ενεργητική. Στην πρώτη περίπτωση δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη κάποιας ενσωματωμένης πηγής φωτός. Στην δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιείται μια ενσωματωμένη δίοδος laser και ένα ανάλογο σύστημα επικοινωνίας προκειμένου να αποσταλεί μια δέσμη φωτός προς τον σκοπευμένο δέκτη.

Οι συνήθεις απαιτήσεις των εφαρμογών για τις οποίες χρησιμοποιούνται τα δίκτυα αισθητήρων δημιουργούν μεγάλη πρόκληση στην επιλογή ενός μέσου μετάδοσης. Για παράδειγμα σε εφαρμογές που μπορούν να είναι υποθαλάσσιες μπορεί να απαιτείται η χρήση του νερού ως μέσου μετάδοσης. Επιπλέον, λόγω του ότι η κεραία ενός αισθητήρα μπορεί να μην έχει το απαιτούμενο ύψος ή ισχύ εκπομπής εκτός από την επιλογή του μέσου, μεγάλο ρόλο παίζει η χρήση ισχυρής κωδικοποίησης και η επιλογή συχνότητας προκειμένου να γίνει στο έπακρο εκμετάλλευση των χαρακτηριστικών του καναλιού.

2.3.7 Κατανάλωση ενέργειας (Power Consumption)

Ο ασύρματος κόμβος αισθητήρα, αφού είναι μια μικρό-ηλεκτρονική συσκευή μπορεί να εφοδιαστεί με μια περιορισμένη πηγή ενέργειας (<0.5 Ah, 1.2V). Η αντικατάσταση αυτής της πηγής ενέργειας συνήθως είναι αδύνατη, συνεπώς η ζωή του κόμβου αισθητήρα εξαρτάται από αυτήν. Σε ένα δίκτυο αισθητήρων ο κάθε κόμβος παίζει το ρόλο του αποστολέα, αλλά και του δρομολογητή. Τυχόν βλάβες σε κάποιους από τους κόμβους δημιουργούν ανάγκη για αναδιοργάνωση του δικτύου και επαναδρομολόγηση των μηνυμάτων. Συνεπώς, η σωστή διαχείριση της ενέργειας των κόμβων παίζει μεγάλο ρόλο. Η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να αποδοθεί σε τρεις λειτουργίες: αίσθηση, επικοινωνία και επεξεργασία δεδομένων.

➤ Κατανάλωση ενέργειας (Power Consumption)

Η πιο απαιτητική λειτουργία από άποψη κατανάλωσης ενέργειας είναι η επικοινωνία. Συνήθως για τις μικρές αποστάσεις που λειτουργούν οι αισθητήριοι κόμβοι η κατανάλωση είναι ίδια κατά την εκπομπή και την λήψη. Βεβαίως, εκτός από αυτό, σοβαρό ρόλο παίζει και το άνοιγμα και κλείσιμο του κυκλώματος του πομποδέκτη. Στο [37] ο συγγραφέας παρουσιάζει μια εξίσωση για την κατανάλωση της ενέργειας κατά την ασύρματη επικοινωνία:

$$P_c = N_T [P_T (T_{on} + T_{st}) + P_{out} (T_{on})] + N_R [P_R (R_{on} + R_{st})] \quad (2.3)$$

Όπου $P_{T/R}$ είναι η ενέργεια που καταναλώνεται από τον πομπό/ δέκτη, P_{out} η ενέργεια εξόδου του πομπού, T/R_{on} ο χρόνος που ο πομπός/ δέκτης είναι ενεργός, T/R_{st} ο χρόνος έναρξης του πομπού/ δέκτη και $N_{T/R}$ ο αριθμός των φορών που ο πομπός/ δέκτης ανοίγει στην μονάδα του χρόνου, ο οποίος και εξαρτάται από το ανατιθέμενο σκοπό αλλά και το πρωτόκολλο στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων (MAC Layer). Οι σημερινοί πομποδέκτες έχουν τυπικές τιμές P_T και P_R περίπου στα 20 dbm και P_{out} κοντά στα 0 dbm. Στο [38] αναφέρεται ο σχεδιασμός ενός χαμηλού κόστους και μικρού μεγέθους και μικρής ενέργειας πομποδέκτη.

➤ Επεξεργασία Δεδομένων

Στο άρθρο [39] φαίνεται πόσο μικρότερη είναι η καταναλισκόμενη ενέργεια κατά την φάση της επεξεργασίας των δεδομένων σε σχέση με την επικοινωνία. Συνεπώς θα πρέπει ο κόμβος να έχει ενσωματωμένο κύκλωμα επεξεργασίας προκειμένου να επεξεργάζεται τα δεδομένα με απώτερο σκοπό να στέλνει το δυνατόν λιγότερα πακέτα κατά την φάση της επικοινωνίας. Η ενέργεια που καταναλώνει ένας επεξεργαστής εξαρτάται από την τάση και την συχνότητα λειτουργίας. Συνεπώς, αν μειώσουμε τους δύο αυτούς παράγοντες θα έχουμε και μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας. Βέβαια, θα πρέπει να συμβιβαστούμε διότι και η ικανότητα επεξεργασίας θα μειωθεί. Μια άλλη εναλλακτική είναι να εκμεταλλευτούμε το γεγονός ότι ο επεξεργαστής εργάζεται λίγες φορές στο μέγιστο της απόδοσής του και έτσι μπορούμε να έχουμε ένα δυναμικό τρόπο αυξομείωσης του ρεύματος και της συχνότητας λειτουργίας του. Στα άρθρα [40,41,42,43] αναφέρονται τρόποι προκειμένου η δυναμική λειτουργία του επεξεργαστή να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στις απαιτήσεις και να μειωθεί η απαιτούμενη ενέργεια.

Η ενέργεια που σπαταλάτε μπορεί να δοθεί ως εξής :

$$P_p = CV_{dd}^2 f_T + V_{dd} I_0 e^{\frac{V_{dd}}{nV_T}} \quad (2.4)$$

όπου C είναι η ολική χωρητικότητα μεταγωγής (total switching capacitance), V_{dd} η τάση και f η συχνότητα αλλαγής.

2.3.8 Διάρκεια ζωής (Lifetime)

Κρίσιμη σε οποιαδήποτε ασύρματη επέκταση δικτύων αισθητήρων είναι η αναμενόμενη διάρκεια ζωής. Ο στόχος και των εφαρμογών περιβαλλοντικού ελέγχου και των εφαρμογών ασφάλειας είναι να τοποθετηθούν κόμβοι, αφύλακτοι για μήνες ή ακόμη και έτη. Ο αρχικός περιοριστικός παράγοντας για τη διάρκεια ζωής ενός δικτύου αισθητήρων είναι η

χωρητικότητα του συσσωρευτή ενέργειας του συστήματος, δηλαδή ο ενεργειακός ανεφοδιασμός. Κάθε κόμβος πρέπει να σχεδιαστεί για να κατορθώσει τον τοπικό ανεφοδιασμό ενέργειάς του προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η συνολική διάρκεια ζωής δικτύων. Σε πολλές επεκτάσεις δεν είναι η μέση διάρκεια ζωής κόμβων που είναι σημαντική, αλλά μάλλον η ελάχιστη διάρκεια ζωής κόμβων. Στην περίπτωση των ασύρματων συστημάτων ασφάλειας, κάθε κόμβος πρέπει να διαρκέσει για τα πολλαπλάσια έτη. Μια αποτυχία ενός κόμβου θα δημιουργούσε ευπάθεια σε όλο το σύστημα ασφάλειας. Σε μερικές καταστάσεις μπορεί να είναι δυνατό να γίνει χρήση εξωτερικής ενέργειας. Εντούτοις, ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα στα ασύρματα συστήματα είναι η ευκολία της εγκατάστασης. Η απαίτηση, λοιπόν, να παρασχεθεί ενέργεια εξωτερικά σε όλους τους κόμβους στην ουσία καταργεί κατά ένα μεγάλο μέρος αυτό το πλεονέκτημα. Ένας συμβιβασμός είναι να υπάρξει μια μικρή ομάδα ειδικών κόμβων που συνδέονται με καλώδιο στην υποδομή ενέργειας.

Στα περισσότερα σενάρια εφαρμογών, η πλειοψηφία των κόμβων θα πρέπει να είναι αυτοτροφοδοτούμενοι. Θα πρέπει, λοιπόν, είτε να περιέχουν αρκετή αποθηκευμένη ενέργεια για να διαρκέσουν για χρόνια, είτε αυτοί θα πρέπει να είναι σε θέση να αντλήσουν ενέργεια από το περιβάλλον μέσω συσκευών όπως οι ηλιακές κυψέλες είτε οι πιεζοηλεκτρικές γεννήτριες.

Και οι δύο επιλογές απαιτούν η μέση κατανάλωση ενέργειας των κόμβων να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερη. Ο σημαντικότερος παράγοντας στον καθορισμό της διάρκειας ζωής ενός ενεργειακού ανεφοδιασμού είναι η κατανάλωση ισχύος. Σε έναν ασύρματο κόμβο αισθητήρων ο ραδιοπομπός καταναλώνει ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας του συστήματος. Αυτή η κατανάλωση ισχύος μπορεί να μειωθεί είτε μέσω της μείωσης της ισχύος μετάδοσης ή μέσω της μείωσης του κύκλου ζωής του ραδιοπομπού. Και οι δύο εναλλακτικές λύσεις περιλαμβάνουν τη «θυσία» άλλων παραγόντων του συστήματος.

2.3.9 QoS

Σε κάποιες εφαρμογές είναι σημαντικό τα δεδομένα να παραδίδονται μέσα σε ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα από τη στιγμή της μέτρησης, αφού μια πιθανή καθυστέρηση θα τα καταστήσει άχρηστα. Μια, ακόμη, προϋπόθεση για εφαρμογές με χρονικούς περιορισμούς είναι η περιορισμένη καθυστέρηση της παράδοσης δεδομένων.

Από την άλλη μεριά, σε πολλά δίκτυα η εξοικονόμηση ενέργειας, η οποία σχετίζεται άμεσα με το χρόνο για τον οποίο το δίκτυο μπορεί να είναι λειτουργικό, θεωρείται πολύ πιο σημαντική από την ποιότητα των δεδομένων που μεταδίδονται. Όσο το ενεργειακό απόθεμα

του δικτύου μειώνεται το δίκτυο μπορεί να μειώσει την ποιότητα των αποτελεσμάτων με σκοπό να μειώσει την απώλεια ενέργειας στους κόμβους και άρα να επιμηκύνει το συνολικό χρόνο λειτουργικότητας του δικτύου. Άρα, πρωτόκολλα δρομολόγησης με επίγνωση του ενεργειακού αποθέματος πρέπει να συνυπολογίζουν την παράμετρο της ποιότητας υπηρεσιών.

2.3.10 Ασφάλεια (Security)

Παρά τη φαινομενικά αβλαβή φύση ακόμη και της απλής θερμοκρασίας ή άλλων «ελαφριών» πληροφοριών από μια εφαρμογή περιβαλλοντικού ελέγχου, η ασφαλής διατήρηση αυτών των πληροφοριών μπορεί να είναι εξαιρετικά σημαντική. Σημαντικά σχέδια μπορούν να εξαχθούν εύκολα από ένα ίχνος θερμοκρασίας και ελαφριάς δραστηριότητας σε ένα κτίριο γραφείων. Σε λάθος χέρια, αυτές οι πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προγραμματιστεί μια στρατηγική ή φυσική επίθεση σε μια επιχείρηση. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων πρέπει να είναι ικανά να διατηρούν κρυφές τις πληροφορίες που συλλέγουν από μη εξουσιοδοτημένα πρόσωπα.

Δεδομένου ότι εξετάζουμε εφαρμογές προσανατολισμένες προς την ασφάλεια, η ασφάλεια δεδομένων γίνεται ακόμα σημαντικότερη. Όχι μόνο πρέπει το σύστημα να διατηρήσει τη μυστικότητα, πρέπει επίσης να είναι σε θέση να επικυρώσει τη μετάδοση των δεδομένων. Το δίκτυο δεν πρέπει να παράγει μήνυμα ψεύτικου συναγερμού ή να επαναλάβει ένα παλαιό μήνυμα συναγερμού ως τρέχοντα. Ένας συνδυασμός μυστικότητας και αυθεντικοποίησης απαιτείται για να καλύψει τις ανάγκες και των τριών αυτών περιπτώσεων.

Η χρήση των τεχνικών της κρυπτογράφησης και της αυθεντικοποίησης κοστίζει τόσο σε κατανάλωση ισχύος όσο και στο διαθέσιμο εύρος ζώνης του δικτύου.

Επιπλέον υπολογισμός πρέπει να εκτελεσθεί για να κρυπτογραφηθούν και να αποκρυπτογραφηθούν τα δεδομένα και πρόσθετα bits τα οποία περιέχουν τις πληροφορίες αυθεντικοποίησης πρέπει να διαβιβαστούν με κάθε πακέτο. Αυτό προσκρούει στην απόδοση της εφαρμογής με μείωση του αριθμού των δειγμάτων που μπορούν να μεταδοθούν από ένα δεδομένο δίκτυο.

2.3.11 Περιορισμοί υλικού (Hardware Constraint)

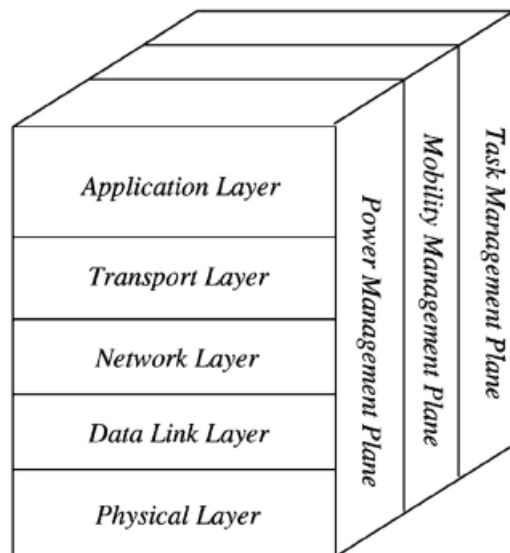
Στην **Ενότητα 2.2** περιγράψαμε τις υπομονάδες από τις οποίες αποτελείται ένας κόμβος αισθητήρα. Όλες αυτές πρέπει να μπορούν να χωρέσουν σε ένα χώρο μεγέθους σπιρτόκουτου. Το απαιτούμενο μέγεθος μπορεί να απαιτείται να είναι μικρότερο από ένα κυβικό εκατοστό και να είναι αρκετά ελαφρύ για να παραμένει αιωρούμενο στον αέρα. Εκτός από το μέγεθος, υπάρχουν ακόμα πιο αυστηροί περιορισμοί για τους κόμβους αισθητήρων, όπως:

- Πρέπει να καταναλώνουν εξαιρετικά χαμηλή ενέργεια.
- Πρέπει να λειτουργούν ακόμα και σε πολύ πυκνή χωρική τοποθέτηση.
- Πρέπει να έχουν χαμηλό κόστος παραγωγής και να είναι αναλώσιμοι.
- Πρέπει να είναι αυτόνομοι και να λειτουργούν χωρίς παρακολούθηση.
- Πρέπει να προσαρμόζονται στο περιβάλλον που θα λειτουργούν.

Αφού οι κόμβοι αισθητήρων είναι συνήθως μη προσβάσιμοι, η διάρκεια ζωής ενός δικτύου αισθητήρων εξαρτάται άμεσα από την διάρκεια ζωής των πηγών ενέργειας των κόμβων. Η ενέργεια είναι ένας σπάνιος πόρος του συστήματος εξαιτίας των περιορισμών του μεγέθους. Για παράδειγμα, η ολική αποθηκευμένη ενέργεια σε μια «έξυπνη σκόνη» είναι της τάξης του 1J. Για το σύστημα του ολοκληρωμένου ασύρματου δικτύου αισθητήρων (Wireless Integrated Network Sensors WINS), η ολική ενέργεια που πρέπει να παρέχεται πρέπει να είναι μικρότερη των 30μΑ προκειμένου να έχει μεγάλη διάρκεια λειτουργίας. Οι κόμβοι στο παραπάνω σύστημα παίρνουν ενέργεια από μια τυπική μπαταρία Λιθίου (Li) τύπου νομίσματος (2.5 cm διάμετρος και 1 cm πάχος). Είναι δυνατόν να επεκτείνουμε την διάρκεια ζωής των δικτύων αισθητήρων χρησιμοποιώντας τεχνικές εξαγωγής και παραγωγής ενέργειας από το περιβάλλον, όπως είναι οι ηλιακές κυψέλες.

2.4 Protocol Stack

Οι κόμβοι αισθητήρων, όπως οποιαδήποτε άλλη συσκευή τηλεπικοινωνιών, χρησιμοποιούν μια συγκεκριμένη στοίβα πρωτοκόλλων (protocol stack). Σε αυτή την ενότητα περιγράφουμε το στόχο κάθε στρώματος (layer) και επιπλέον γίνεται μια αναφορά στα πιο κοινά πρωτόκολλα που συνδέονται με κάθε στρώμα. Στην **Εικόνα 7** αναπαριστούμε την στοίβα πρωτοκόλλων που χρησιμοποιείται από όλους τους κόμβους αισθητήρων.



Εικόνα 7: Στοιβά Πρωτοκόλλων Ασύρματου Κόμβου [Akyildiz et al., 5].

2.4.1 Φυσικό στρώμα (Physical layer)

Το φυσικό στρώμα είναι υπεύθυνο για την επιλογή της συχνότητας, την δημιουργία του φέροντος, την ανίχνευση του σήματος, την διαμόρφωση και την κρυπτογράφηση των δεδομένων. Βασικός παράγοντας στον σχεδιασμό του παραμένει η ενέργεια που καταναλώνεται στην επικοινωνία. Βέβαια, εξαιτίας της πυκνής χωρικά ανάπτυξης των αισθητήρων και της δυνατότητας επικοινωνίας μέσω πολλαπλών κόμβων (multi-hop communication) έχουμε σημαντική εξοικονόμηση στην ενέργεια, αλλά και μικρές απώλειες στο σήμα, άρα δυνατότητα για μικρότερη εκπεμπόμενη ενέργεια. Τεχνικές όπως είναι οι Ultra Wideband, Impulse Radio και Pulse Position modulation έχουν χρησιμοποιηθεί ώστε να μειωθεί η πολυπλοκότητα και οι ενεργειακές απαιτήσεις.

2.4.2 Στρώμα ζεύξης δεδομένων (Data link layer)

Το στρώμα αυτό είναι υπεύθυνο για την πολυπλεξία των δεδομένων, την ανίχνευση των πλαισίων δεδομένων, την πρόσβαση στο μέσο και τον έλεγχο λαθών. Εξασφαλίζει point-to-point και point-to-multipoint συνδέσεις μέσα στο δίκτυο. Τα συνηθισμένα MAC (Medium Access Control) πρωτόκολλα, λόγω των περιορισμών που υπάρχουν στο δίκτυο, δεν ταιριάζουν στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Κάποια γνωστά πρωτόκολλα του

επιπέδου ζεύξης δεδομένων είναι: SMACS (Self-organized Medium Access Control for Sensor Networks) [Sohrabi, 2000], EARS (Eavesdrop and Register Algorithm) [Sohrabi, 2000], CSMA-Based medium access protocol [Woo και Culler, 2001] και Hybrid TDMA/FDMA- Based Protocols [Shih et al, 2001].

2.4.3 Στρώμα δικτύου (Network layer)

Το στρώμα αυτό είναι υπεύθυνο για την δρομολόγηση και τη συνάθροιση των δεδομένων μέσα σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Παρουσιάζει ορισμένα κοινά στοιχεία με το αντίστοιχο επίπεδο στα ad hoc δίκτυα παρολαυτά έχει μεγαλύτερες απαιτήσεις όσον αφορά στην επεκτασιμότητα, την ενεργειακή απόδοση και την εστίαση στα δεδομένα. Λόγω των απαιτήσεων αυτών τα υπάρχοντα πρωτόκολλα δρομολόγησης δεν επαρκούν και απαιτείται η χρήση άλλων. Οι αρχές σύμφωνα με τις οποίες πρέπει να σχεδιάζεται το στρώμα δικτύου ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων είναι:

- Αποτελεσματική χρήση της ενέργειας.
- Τα δίκτυα αισθητήρων είναι συνήθως δεδομενο-κεντρικά.
- Η συνάθροιση δεδομένων είναι χρήσιμη, μόνο όταν δεν εμποδίζει την συνεργατική προσπάθεια των ασύρματων κόμβων.
- Ένα ιδανικό δίκτυο αισθητήρων έχει διευθυνσιοδότηση βασισμένη σε χαρακτηριστικά και γνώση της θέσης.

Μερικά από τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται είναι: SMECN (Small Minimum Energy Communication Network) [Li και Halpern, 2001], SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation) [Heinzelman et al., 1999], SAR (Sequential Assignment Routing) [Sohrabi, 2000], LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) [Heinzelman et al., 2000] και Directed Diffusion [Intanagowiwat et al., 2000].

2.4.4 Στρώμα μεταφοράς (Transport layer)

Το στρώμα αυτό είναι αναγκαίο όταν το σύστημα πρόκειται να είναι προσβάσιμο μέσω του Διαδικτύου ή άλλων εξωτερικών δικτύων. Αυτό είθισται να συμβαίνει εφόσον τα δίκτυα αισθητήρων εγκαθίστανται προκειμένου να παρακολουθήσουν γεγονότα και να μεταδώσουν πληροφορίες. Έτσι, η ανάγκη σύνδεσης ενός δικτύου ασύρματων αισθητήρων με άλλα δίκτυα είναι απαραίτητη. Ωστόσο, κανένα πρωτόκολλο δεν έχει δημιουργηθεί για να

αντιμετωπίσει πλήρως αυτό το θέμα. Τα τροποποιημένα TCP/UDP πρωτόκολλα μπορεί να είναι μια κατάλληλη λύση, αλλά αυτό δεν έχει ακόμα καθιερωθεί. Μια αλλαγή που μπορεί να γίνει στο TCP πρωτόκολλο είναι ο τερματισμός του πρωτοκόλλου να γίνεται στο sink, όπου θα τερματίζεται και η σύνδεση TCP. Από εκεί και πέρα κάποιο ειδικό πρωτόκολλο μεταφοράς μπορεί να αναλάβει τη διακίνηση της πληροφορίας μεταξύ των ασύρματων κόμβων και του sink. Αυτή η διαφοροποίηση είναι αναγκαία λόγω των χαρακτηριστικών των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, καθώς και του διαφορετικού τρόπου διευθυνσιοδότησης που βασίζεται στα χαρακτηριστικά της πληροφορίας και όχι σε καθολικές διευθύνσεις των αισθητήρων.

2.4.5 Στρώμα εφαρμογής (Application layer)

Το στρώμα αυτό είναι υπεύθυνο για να παρουσιάζει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες στην εφαρμογή και να μεταφέρει τα αιτήματα από την εφαρμογή στα κατώτερα στρώματα της στοίβας. Το στρώμα εφαρμογής παραμένει ένας υπό εξερεύνηση τομέας για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Κάποια από τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται σε αυτό το επίπεδο είναι: SMP (Sensor Management Protocol) [Shen et al., 2001], TADAP (Task Assignment and Data Advertisement Protocol) [Shen et al., 2001] και SQDDP (Sensor Query and Data Dissemination Protocol) [Shen et al., 2001].

2.4.6 Επίπεδο διαχείρισης ενέργειας (Power management plane)

Το επίπεδο αυτό διαχειρίζεται τον τρόπο με τον οποίο ένας κόμβος χρησιμοποιεί την ενέργεια που διαθέτει. Για παράδειγμα, ένας αισθητήρας μπορεί να κλείσει τον δέκτη του, όταν λάβει ένα μήνυμα από έναν γειτονικό κόμβο. Έτσι, με αυτό τον τρόπο αποφεύγει να λαμβάνει διπλά μηνύματα. Επιπλέον, όταν το επίπεδο ενέργειάς του είναι χαμηλό ο κόμβος μπορεί να ενημερώσει τους γείτονές του ότι δεν μπορεί να πάρει μέρος σε διαδρομές δρομολόγησης. Η ενέργεια που απομένει στον κόμβο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την συγκέντρωση δεδομένων.

2.4.7 Επίπεδο διαχείρισης κινητικότητας (Mobility management plane)

Το επίπεδο αυτό ανιχνεύει και σημειώνει την κίνηση των κόμβων αισθητήρων, έτσι ώστε να διατηρείται πάντα μια διαδρομή προς τον χρήστη και οι κόμβοι να γνωρίζουν τους γειτονικούς τους κόμβους. Γνωρίζοντας οι κόμβοι τους γείτονές τους μπορούν να κάνουν ρυθμίσεις στην ενέργειά τους και τα καθήκοντά τους.

2.4.8 Επίπεδο διαχείρισης έργου (Task management plane)

Το επίπεδο αυτό ρυθμίζει και σχεδιάζει τα καθήκοντα συγκέντρωσης δεδομένων του κάθε κόμβου για μία συγκεκριμένη περιοχή. Δεν είναι απαραίτητο όλοι οι κόμβοι σε μια περιοχή να συγκεντρώνουν δεδομένα ταυτόχρονα, αλλά κάποιοι από αυτούς μπορούν να πραγματοποιούν πιο συχνά τη συγκεκριμένη διαδικασία ανάλογα με τα επίπεδα ενέργειάς τους. Έτσι, οι κόμβοι μπορούν να συνεργάζονται εξοικονομώντας ενέργεια, να δρομολογούν δεδομένα στο δίκτυο αισθητήρων και να μοιράζονται πληροφορίες και πόρους. Χωρίς το επίπεδο αυτό κάθε κόμβος θα δούλευε μεμονωμένα και έτσι ο χρόνος ζωής του δικτύου θα ήταν μικρότερος λόγω της μεγαλύτερης κατανάλωσης ενέργειας.

Κεφάλαιο 3ο – Πρωτόκολλα Δρομολόγησης

3.1 Εισαγωγή

Στην **Ενότητα 2.4.3** αναφέραμε ότι απαιτούνται ειδικά πρωτόκολλα δρομολόγησης προκειμένου η πληροφορία να φθάσει από το φαινόμενο στους τελικούς χρήστες. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που χρησιμοποιούνται σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με κάποιες παραμέτρους:

1. Τρόπος δρομολόγησης:

- Προδραστική δρομολόγηση (proactive routing): Το επίπεδο δικτύου έχει υπολογίσει όλες τις πιθανές διαδρομές χωρίς να έχουν ζητηθεί και τις ανανεώνει περιοδικά. Έτσι, έχει μια συνολική εικόνα του δικτύου και των καλύτερων διαδρομών.
- Αντιδραστική δρομολόγηση (reactive routing): Το δίκτυο βρίσκει την ζητούμενη διαδρομή μόνο όταν την χρειάζεται. Έτσι, δεν δημιουργείται επιπλέον κίνηση όταν αλλάζει το δίκτυο, αλλά για κάθε δεδομένο που δημιουργείται υπάρχει μεγαλύτερο overhead.
- Υβριδική δρομολόγηση (hybrid routing): Είναι ένας συνδυασμός και των δύο. Κάνοντας χρήση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των δικτύων αισθητήρων μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε άλλους τρόπους δρομολόγησης που βασίζονται στην διάδοση ερωτημάτων που αφορούν είτε πληροφορίες περιεχομένου είτε πληροφορία θέσης.

Όταν έχουμε επικοινωνία μεταξύ λίγων κόμβων και σε μη τακτά διαστήματα η αντιδραστική δρομολόγηση είναι προτιμότερη, ενώ αν έχουμε συχνή επικοινωνία με υψηλούς ρυθμούς και με όλους τους κόμβους είναι προτιμότερη η προδραστική δρομολόγηση.

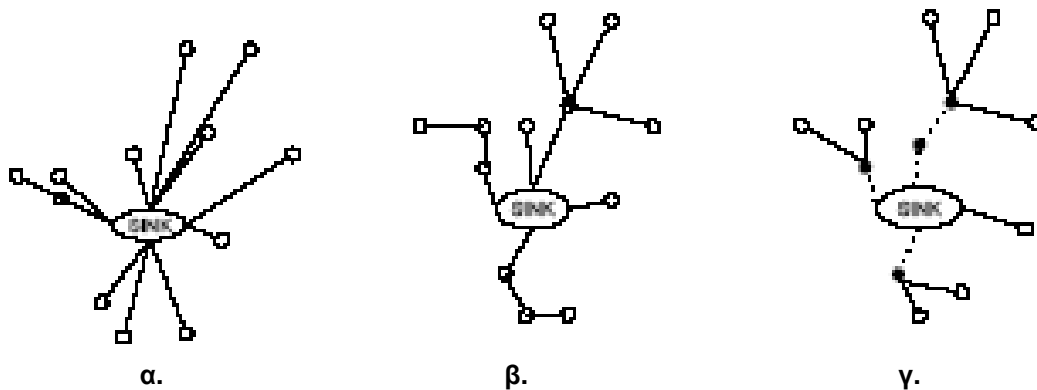
2. Γνώση της θέσης:

- Δρομολόγηση με γνώση της θέσης του κάθε κόμβου: όπου η απόσταση μεταξύ των γειτονικών κόμβων μπορεί να εκτιμηθεί με βάση την ισχύ των εισερχόμενων σημάτων. Ανταλλάσσοντας αυτού του είδους την πληροφορία οι γειτονικοί κόμβοι μπορούν να αποκτήσουν παραπλήσιες συντεταγμένες. Ένας άλλος τρόπος για την έρευνα της θέσης ενός κόμβου είναι χρησιμοποιώντας ένα GPS σε κάθε κόμβο.
- Δρομολόγηση χωρίς γνώση της θέσης του κάθε κόμβου

3. Τρόπος συμμετοχής των κόμβων:

- Άμεση επικοινωνία (direct communication): η οποία δεν είναι εφικτή μιας και οι απαιτήσεις σε ενέργεια αυξάνουν με την έκταση του δικτύου. **(Εικόνα 8.α)**

- Επίπεδη δρομολόγηση (flat routing): οι γειτονικοί κόμβοι επικοινωνούν μεταξύ τους προκειμένου να μεταδώσουν την πληροφορία. Οι κόμβοι κοντά στον sink έχουν μεγάλη απαίτηση σε ενέργεια, αφού διακινούν όλη την πληροφορία μεταξύ του δικτύου και του sink. **(Εικόνα 8.β)**
- Πρωτόκολλα δρομολόγησης με ομάδες (clustering routing protocols): είναι τα καταλληλότερα για τα δίκτυα αισθητήρων, αφού έχουν αρκετά πλεονεκτήματα. Οι κόμβοι χρειάζεται να αποθηκεύουν πληροφορία μόνο για τον επικεφαλής της ομάδας, οπότε το δίκτυο μπορεί εύκολα να επεκταθεί. Οι διαδρομές ανακαλύπτονται και συντηρούνται εύκολα και έχουν μικρή κατανάλωση ενέργειας, αφού τα δεδομένα συγκεντρώνονται στους επικεφαλείς των ομάδων, όπου γίνεται η επεξεργασία τους. **(Εικόνα 8.γ)**



Εικόνα 8: Πρωτόκολλα δρομολόγησης ανάλογα με τον τρόπο συμμετοχής των κόμβων.

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης μπορούν να ομαδοποιηθούν σε:

- Δεδομενο-κεντρικά
- Ιεραρχικά
- Βασισμένα στη θέση
- Βασισμένα στην ροή του δικτύου και στην ποιότητα της υπηρεσίας

Τα δεδομενο-κεντρικά πρωτόκολλα βασίζονται σε ερωτήματα όπως συμβαίνει σε μια βάση δεδομένων και εξαρτώνται από την ονομασία των επιθυμητών δεδομένων. Τα ιεραρχικά πρωτόκολλα στοχεύουν στην ομαδοποίηση των κόμβων. Οι επικεφαλείς κόμβοι συγκεντρώνουν τα δεδομένα της κάθε ομάδας έτσι ώστε να μειώσουν τα δεδομένα που πρόκειται να εκπνευθούν με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας. Τα πρωτόκολλα που βασίζονται στην γνώση της θέσης των κόμβων χρησιμοποιούν αυτή την πληροφορία για να αναμεταδώσουν τα δεδομένα σε επιθυμητές περιοχές αντί σε όλο το δίκτυο. Τέλος, τα πρωτόκολλα της τελευταίας ομάδας επιλέγουν διαδρομές για την μετάδοση των δεδομένων οι οποίες έχουν σαν στόχο να αυξήσουν την διάρκεια ζωής του δικτύου και να παρέχουν καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών.

3.2 Δεδομένο-κεντρικά πρωτόκολλα δρομολόγησης

Σε αυτή την ομάδα πρωτοκόλλων δρομολόγησης ο sink στέλνει ερωτήματα σε συγκεκριμένες περιοχές και περιμένει τα δεδομένα από τους αισθητήρες που βρίσκονται σε αυτές τις περιοχές. Επειδή τα δεδομένα ζητούνται μέσω ερωτημάτων θα πρέπει να υπάρχει ονοματοδοσία βασισμένη σε χαρακτηριστικά προκειμένου να καθοριστούν πλήρως οι ιδιότητες των δεδομένων.

3.2.1 Flooding και Gossiping

Δύο πολύ αντιπροσωπευτικά παραδείγματα αυτής της κατηγορίας είναι το flooding και το gossiping [5,6,13]. Στο flooding κάθε κόμβος όταν λαμβάνει ένα πακέτο δεδομένων το στέλνει με broadcast σε όλους τους γείτονες του και αυτό συμβαίνει μέχρι το πακέτο να φθάσει στον προορισμό ή να ξεπεραστεί ο μέγιστος αριθμός των hops για το πακέτο. Από την άλλη μεριά το gossiping είναι και αυτό ένα είδος flooding μόνο που εδώ ο κόμβος στέλνει το πακέτο τυχαία σε έναν γείτονα και αυτός με τη σειρά του σε έναν άλλο κ.ο.κ.

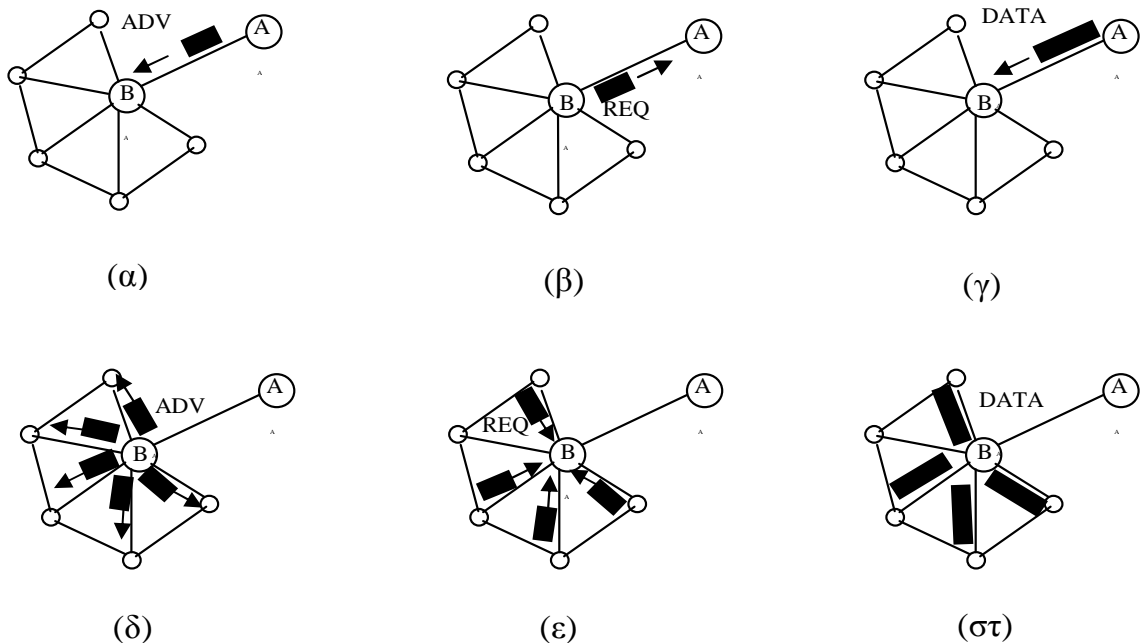
Το flooding έχει πολύ εύκολη υλοποίηση, αλλά έχει τρία μειονεκτήματα. Πρώτον, έχουμε μεγάλη συγκέντρωση από αντίγραφα μηνυμάτων που στέλνονται από τον ίδιο κόμβο (implosion). Δεύτερον, υπάρχει επικάλυψη (overlap) όταν δύο ή περισσότεροι κόμβοι που ανιχνεύουν το ίδιο γεγονός στέλνουν παρόμοια πακέτα πληροφορίας στον ίδιο γείτονα και τρίτο καταναλώνει πολύ ενέργεια χωρίς να λαμβάνει υπόψη της τους ενεργειακούς περιορισμούς.

Το gossiping αποφεύγει το implosion, καθώς κάθε φορά το πακέτο στέλνεται σε έναν κόμβο. Το μειονέκτημα του πρωτοκόλλου είναι ότι έχει προβλήματα καθυστερήσεων στη διάδοση της πληροφορίας.

3.2.2 SPIN (Sensor Protocol for Information via Negotiation)

Το SPIN [6,7,14] δημιουργήθηκε για να διορθώσει τα προβλήματα του flooding και πετυχαίνει αποτελεσματική χρήση της ενέργειας. Η ιδέα πίσω από το SPIN είναι η ονοματοδοσία των δεδομένων χρησιμοποιώντας υψηλού επιπέδου περιγραφείς ή μετα-δεδομένα. Πριν την μετάδοση γίνεται η διαφήμιση των υπαρχόντων δεδομένων, αλλά και

των αναγκών σε νέα δεδομένα. Υπάρχουν τρία είδη μηνυμάτων που ανταλλάσσονται μεταξύ των κόμβων το μήνυμα ADV που επιτρέπει τον αισθητήρα να διαφημίσει τα δεδομένα του, το μήνυμα REQ για να ζητήσει συγκεκριμένα δεδομένα και το μήνυμα DATA για να μεταφέρει τα πραγματικά δεδομένα. Στην **Εικόνα 9** απεικονίζονται τα βήματα του πρωτοκόλλου.



Εικόνα 9: Πρωτόκολλο SPIN. [Akkaya et al., 6].

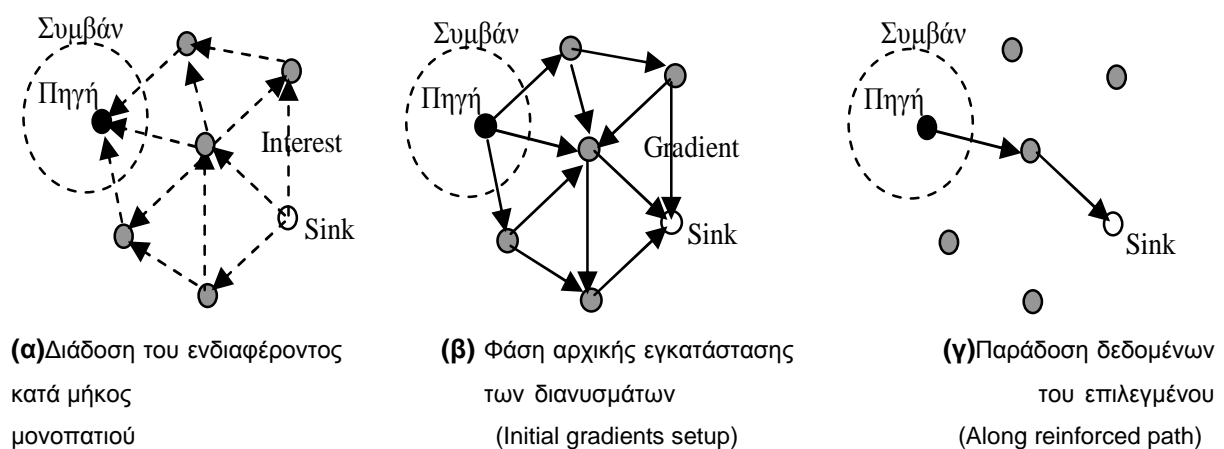
(α) Ο κόμβος A ξεκινά διαφημίζοντας τα δεδομένα του προς τον κόμβο B. **(β)** Ο κόμβος B απαντά στέλνοντας μία αίτηση προς τον κόμβο A. **(γ)** Αφού λάβει τα αιτούμενα δεδομένα, **(δ)** ο κόμβος B στέλνει κατόπιν διαφημίσεις των δεδομένων του προς τους γείτονές του, **(ε-στ)** οι οποίοι ανταποκρίνονται στέλνοντας προς τον κόμβο B τις αιτήσεις τους.

Το πρωτόκολλο αυτό πετυχαίνει 3,5 φορές μικρότερη απώλεια ενέργειας σε σχέση με το flooding και μείωση στο μισό (50%) των περιττών δεδομένων (μικρότερος πλεονασμός). Οι οποιοσδήποτε αλλαγές στην τοπολογία παραμένουν σε τοπικό επίπεδο, αφού ο κάθε κόμβος είναι απαραίτητο να γνωρίζει τους γείτονες του και μόνο.

Ο μηχανισμός που χρησιμοποιεί το SPIN δεν μπορεί να εγγυηθεί την παράδοση των δεδομένων, γιατί μεταξύ των κόμβων που ενδιαφέρονται για συγκεκριμένη πληροφορία και αυτών που την διαθέτουν μπορεί να παρεμβάλλονται κόμβοι οι οποίοι δεν ενδιαφέρονται για την συγκεκριμένη πληροφορία. Γενικώς, δεν ενδείκνυται η χρήση του σε κρίσιμες εφαρμογές όπως, σύστημα συναγερμού για ανίχνευση παραβιάσεων όπου απαιτείται αξιόπιστη παράδοση των δεδομένων σε τακτά χρονικά διαστήματα.

3.2.3 Directed Diffusion

Το πρωτόκολλο Directed Diffusion [15,16] σχεδιάστηκε για να προωθήσει την εντός του δικτύου επεξεργασία δεδομένων στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Το πρωτόκολλο προβλέπει ότι κάθε αισθητήρας-παραλήπτης (sink) εκπέμπει στο δίκτυο ένα μήνυμα interest, το οποίο περιγράφει τα δεδομένα που θέλει ο παραλήπτης. Καθώς το interest μεταδίδεται διαμέσου του δικτύου εγκαθίσταται μία διαδρομή από την πηγή (source) στον παραλήπτη (sink). Κάθε κόμβος του δικτύου αποθηκεύει τα interests στην μνήμη του. Όταν η πηγή έχει τα δεδομένα, που δηλώνονται από το interest, τα στέλνει διαμέσου της εγκατεστημένης διαδρομής στον παραλήπτη. Η συνάθροιση και η μετάδοση των δεδομένων γίνεται από τους ενδιαμέσους κόμβους. Επίσης, ο παραλήπτης πρέπει να ενημερώσει το μήνυμα interest όταν ξεκινήσει να δέχεται δεδομένα από την πηγή. Τέλος, πρέπει να αναφέρουμε, ότι και τα δυο μέρη αναγνωρίζουν τα δεδομένα από χαρακτηριστικά - γνωρίσματα (attributes), όπως «νοτιοανατολικά» ή «ακουστικοί αισθητήρες». Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιείται ένας απλός μηχανισμός ονοματολογίας και κωδικοποίησης των χαρακτηριστικών με βάση απλούς κανόνες. Τα δεδομένα διαχωρίζονται από την ταυτότητα του κόμβου που τα συλλέγει. Στην **Εικόνα 10** απεικονίζονται οι φάσεις του πρωτοκόλλου Directed Diffusion.



Εικόνα 10: Φάσεις Λειτουργίας του πρωτοκόλλου Directed Diffusion [Akkaya et al., 6].

Στο πρωτόκολλο SPIN είδαμε ότι οι κόμβοι διαφημίζουν για διαθέσιμα δεδομένα επιτρέποντας στους ενδιαφερόμενους κόμβους να ζητήσουν τα δεδομένα. Αντίθετα στο Directed Diffusion ο sink είναι αυτός που ρωτά τους κόμβους αισθητήρων αν τα συγκεκριμένα δεδομένα είναι διαθέσιμα. Το Directed Diffusion έχει μερικά ακόμα πλεονεκτήματα. Επειδή είναι δεδομενο-κεντρικό όλη η επικοινωνία γίνεται γείτονα προς γείτονα χωρίς την ανάγκη για ύπαρξη μηχανισμού που θα απευθύνεται σε συγκεκριμένο κόμβο. Ο κάθε κόμβος, εκτός από την εργασία της αίσθησης, μπορεί να κάνει συνάθροιση των δεδομένων και προσωρινή αποθήκευση (caching). Η προσωρινή αποθήκευση

προσφέρει μεγάλο πλεονέκτημα λόγω της αποτελεσματικής χρήσης της ενέργειας και της μικρής καθυστέρησης. Επίσης, η κατανάλωση της ενέργειας μειώνεται, αφού η πληροφορία δίνεται κατ' απαίτηση και δεν υπάρχει ανάγκη για την διατήρηση γνώσης για την τοπολογία του δικτύου.

Ωστόσο, το πρωτόκολλο αυτό δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις εφαρμογές γιατί βασίζεται σε ένα μοντέλο παράδοσης της πληροφορίας κατ' απαίτηση. Συνεπώς, δεν είναι κατάλληλο για συνεχή παρακολούθηση του περιβάλλοντος. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η ονοματοδοσία των ερωτημάτων, αφού εξαρτάται από την εφαρμογή και πρέπει κάθε φορά τα ερωτήματα να καθορίζονται εξ' αρχής. Τέλος η διαδικασία του ταιριάσματος, δηλαδή ποιες απαντήσεις απευθύνονται σε ποια ερωτήματα, μπορεί να απαιτεί επιπλέον χώρο στην επικεφαλίδα των ερωτημάτων.

3.2.4 Energy Aware Routing

Το πρωτόκολλο Energy Aware Routing [17] είναι παρόμοιο με το Directed Diffusion γιατί ανακαλύπτονται πολλαπλά μονοπάτια από την πηγή μέχρι τον προορισμό (sink). Τα μονοπάτια αυτά επιλέγονται από μια συνάρτηση πιθανοτήτων, η οποία εξαρτάται από την ενεργειακή κατανάλωση στον κάθε κόμβο. Το πρωτόκολλο αυτό θεωρεί ότι χρησιμοποιώντας συνέχεια το μονοπάτι με το μικρότερο κόστος συνεχώς θα έχει ως αποτέλεσμα να εξαντληθεί η ενέργεια των κόμβων. Για να αποφευχθεί αυτό, το κάθε ένα από τα πολλαπλά μονοπάτια χρησιμοποιούνται με μια συγκεκριμένη πιθανότητα έτσι ώστε να αυξηθεί η ζωή του δικτύου.

Το πρωτόκολλο λειτουργεί σε 3 φάσεις :

- *Φάση εγκατάστασης* (Setup Phase), όπου ξεκινά με μια τοπική εύρεση των δρομολογίων από τους κόμβους και δημιουργούν τους πίνακες δρομολόγησης. Ταυτόχρονα υπολογίζεται το ενεργειακό κόστος σε κάθε κόμβο, που αφορά στην εκπομπή και την λήψη μηνυμάτων καθώς επίσης και την απομένουσα ενέργεια των κόμβων. Η πιθανότητα επιλογής για το μονοπάτι είναι αντιστρόφως ανάλογη του κόστους.
- *Φάση Επικοινωνίας* (Data Communication Phase). Κάθε κόμβος προωθεί τα πακέτα επιλέγοντας τυχαία ένα κόμβο από τον πίνακα δρομολόγησης χρησιμοποιώντας την συνάρτηση των πιθανοτήτων.
- *Φάση συντήρησης των διαδρομών* (Route maintenance phase). Γίνεται τοπική εύρεση μονοπατιών προκειμένου να κρατηθούν αυτά τα μονοπάτια ενεργά.

Το Directed Diffusion στέλνει τα δεδομένα μέσα από πολλαπλά μονοπάτια, και ένα από αυτά εξαναγκάζεται να στέλνει δεδομένα σε υψηλότερους ρυθμούς. Σε αντίθεση, το πρωτόκολλο αυτό διαλέγει ένα τυχαίο μονοπάτι προκειμένου να εξοικονομήσει ενέργεια. Αποτέλεσμα να υπάρχει 21.5% οικονομία ενέργειας παραπάνω από ότι το Directed Diffusion και 44% αύξηση στην ζωή του δικτύου.

Αυτή η μέθοδος όμως έχει και μειονεκτήματα, όπως είναι η ικανότητα επαναφοράς (recover) μετά από κάποιο σφάλμα ενός κόμβου, αφού χρησιμοποιείται ένα μονοπάτι σε αντίθεση με το Directed Diffusion. Επίσης, είναι αναγκαία η ύπαρξη πληροφορίας σε σχέση με την θέση των κόμβων και η εγκατάσταση ενός μηχανισμού διευθυνσιοδότησης των κόμβων που περιπλέκει την δρομολόγηση.

3.2.5 Rumor Routing

Το Rumor Routing [18] είναι μια παραλλαγή του Directed Diffusion για εφαρμογή σε περιβάλλοντα όπου δεν εφαρμόζονται κριτήρια γεωγραφικής δρομολόγησης. Όταν ένας κόμβος ανιχνεύσει ένα συμβάν στέλνει στο δίκτυο ένα πακέτο πληροφορίας (agent), που αφορά αυτό το συμβάν, προς τους απομακρυσμένους κόμβους. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται το κόστος της «πλημμύρας» (flooding) προς όλο το δίκτυο. Αποτελέσματα προσομοίωσης έδειξαν ότι σε σχέση με το flooding έχουμε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας και επίσης μπορεί να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά η αστοχία (καταστροφή ή βλάβη) κάποιων κόμβων.

Η διαφορά του από το Directed Diffusion είναι ότι το πρωτόκολλο Rumor Routing διατηρεί ένα μονοπάτι μεταξύ πηγής και προορισμού σε αντίθεση με το πρώτο όπου τα δεδομένα μπορούν να σταλούν μέσω διαφορετικών μονοπατιών σε χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης.

Το πρωτόκολλο αυτό λειτουργεί αποτελεσματικά όταν το πλήθος των συμβάντων είναι μικρό. Αν έχουμε μεγάλο πλήθος συμβάντων και δεν υπάρχει το απαιτούμενο ενδιαφέρον από μέρους της πηγής, τότε το κόστος διατήρησης των πακέτων πληροφορίας (agent) καθώς και των πινάκων με τα δεδομένα είναι μεγάλο, χωρίς να προσφέρει αντίστοιχο όφελος.

3.2.6 Gradient Based Routing

Το Gradient Based Routing [19] αποτελεί μια μικρή παραλλαγή του Directed Diffusion. Η ιδέα είναι ο κάθε κόμβος να κρατάει τον αριθμό των αλμάτων προς τους γείτονές του κατά την φάση της διάχυσης ενδιαφέροντος. Έτσι, ο κάθε κόμβος γνωρίζει πόσο απέχει από τον κόμβο δεξαμενή (sink) σε άλματα το οποίο ονομάζεται και ύψος του κόμβου. Η διαφορά ύψους ενός κόμβου από ένα γειτονικό του κόμβο ονομάζεται κλίση του κόμβου. Τα πακέτα προωθούνται σε μια ζεύξη με τη μεγαλύτερη κλίση. Χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως ο συγκερασμός των δεδομένων και η εξάπλωση τους πετυχαίνει να εξισορροπήσει την κίνηση ομοιόμορφα. Όσον αφορά την εξάπλωση των δεδομένων χρησιμοποιούνται 3 τεχνικές:

- *Stochastic Scheme*, όταν υπάρχουν περισσότερες ζεύξεις με την ίδια κλίση, ο κόμβος επιλέγει μία τυχαία.
- *Energy-Based Routing*, όταν η ενέργεια ενός κόμβου μειωθεί κάτω από μια τιμή, τότε αυτός αυξάνει την κλίση του έτσι ώστε να αποτρέψει άλλους κόμβους στο να τον επιλέξουν για αποστολή δεδομένων και
- *Stream-Based scheme*, όπου η ιδέα είναι να εκτρέπονται οι νέες ροές δεδομένων μακριά από κόμβους που διακινούν κάποια ροή δεδομένων.

Έχει αποδειχτεί ότι η δρομολόγηση με το πρωτόκολλο αυτό υπερτερεί έναντι της δρομολόγησης Directed Diffusion όσον αφορά στην εξοικονόμηση ενέργειας κατά την φάση της επικοινωνίας.

3.2.7 CADR (Constrained Anisotropic Diffusion Routing)

Το CADR [20] αποτελεί και αυτό μια παραλλαγή του Directed Diffusion. Με την δρομολόγηση αυτή προτείνονται 2 τεχνικές. Η μία είναι ερωτήσεις κατευθυνόμενες προς τους αισθητήρες με βάση την πληροφορία και η άλλη είναι η περιορισμένη μη ιστροπική διάχυση. Η όλη ιδέα αφορά στην ερώτηση των αισθητήρων και στην δρομολόγηση των δεδομένων στο δίκτυο προκειμένου να έχουμε κέρδος στην πληροφορία και ταυτόχρονα μείωση των καθυστερήσεων και του χρησιμοποιούμενου εύρους συχνοτήτων. Αυτή είναι και η μεγάλη διαφορά από το Directed Diffusion. Κάθε κόμβος αξιολογεί την πληροφορία και το κόστος διάδοσής της βασιζόμενος σε πληροφορίες που διαθέτει τοπικά, αλλά και στις απαιτήσεις των χρηστών. Επίσης, χρησιμοποιείται και μια άλλη συμπληρωματική τεχνική, σύμφωνα με την οποία ο κάθε κόμβος μπορεί να επιλέγει ποιος κόμβος μπορεί να παρέχει την ζητούμενη πληροφορία με το λιγότερο ενεργειακό κόστος.

Αποτελέσματα προσομοίωσης έδειξαν ότι είναι πιο αποτελεσματικό ενεργειακά από ότι το Directed Diffusion.

3.3 Ιεραρχικά πρωτόκολλα δρομολόγησης

Οι τεχνικές ιεραρχικής δρομολόγησης χρησιμοποιούνται στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων για ενεργειακά αποτελεσματική δρομολόγηση. Οι κόμβοι με υψηλά ενεργειακά αποθέματα χρησιμοποιούνται για να επεξεργαστούν και να στείλουν πληροφορίες, ενώ οι χαμηλής ενέργειας κόμβοι χρησιμοποιούνται για να λαμβάνουν δεδομένα.

Η δημιουργία ομάδων κόμβων αισθητήρων (clusters) και η ανάθεση ιδιαίτερων διεργασιών στους επικεφαλείς κόμβους των ομάδων (cluster heads) μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη συνολική κλιμάκωση του συστήματος, στον χρόνο ζωής και στη σωστή χρήση της ενέργειας. Η ιεραρχική δρομολόγηση είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας μέσα σε ένα cluster διεξάγοντας συγκέντρωση και συγχώνευση δεδομένων με στόχο τη μείωση των μεταδιδόμενων πακέτων.

3.3.1 LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)

Το LEACH [6,7,8] είναι ένα από τα πιο διάσημα ιεραρχικά πρωτόκολλα δρομολόγησης για δίκτυα αισθητήρων. Η λειτουργία του βασίζεται στην δημιουργία clusters, που βασίζονται στην ένταση του λαμβανόμενου σήματος και στην χρήση των cluster heads σαν δρομολογητών μεταξύ των κόμβων και του sink. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται εξοικονόμηση ενέργειας, αφού η εκπομπή δεδομένων προς τον sink γίνεται μόνο από τους cluster heads και όχι από όλους τους κόμβους. Ο βέλτιστος (optimal) αριθμός των cluster heads είναι το 5% των συνολικών κόμβων. Η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται στους cluster heads. Η λειτουργία του πρωτοκόλλου έχει 2 φάσεις: α) την *φάση εγκατάστασης* και β) την *σταθερή φάση*. Κατά την α) φάση επιλέγονται οι cluster heads. Προκειμένου να γίνει εξισορρόπηση της απώλειας ενέργειας μεταξύ των κόμβων, οι cluster heads αλλάζουν τυχαία στο χρόνο. Ο τρόπος της αλλαγής γίνεται με τον κόμβο να επιλέγει ένα τυχαίο αριθμό μεταξύ του 0 και του 1. Ο κόμβος γίνεται cluster head, αν ο αριθμός που επέλεξε είναι μικρότερος από την ακόλουθη τιμή κατωφλίου $T(n)$:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p * (r \bmod \frac{1}{p})} & \text{αν } n \in G \\ 0 & \text{σε διαφορετική περίπτωση} \end{cases} \quad (3.1)$$

όπου p είναι το επιθυμητό ποσοστό των cluster heads, π.χ. 0.05, r είναι ο τρέχων γύρος επιλογής και G είναι το σύνολο των κόμβων που δεν υπήρξαν cluster heads τους τελευταίους $1/p$ γύρους. Μόλις επιλεγούν οι cluster heads, στέλνουν μηνύματα (advertise) προς όλους τους κόμβους του δικτύου ότι είναι cluster heads πλέον. Όταν οι κόμβοι αισθητήρων λαμβάνουν αυτό το μήνυμα, αποφασίζουν για το cluster στο οποίο θέλουν να ανήκουν βασιζόμενοι στην ένταση του σήματος του μηνύματος που έλαβαν. Κατόπιν ειδοποιούν τον αντίστοιχο cluster head ότι θα ανήκουν στο cluster του. Τέλος, ο cluster head ορίζει τα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία οι κόμβοι αισθητήρων μπορούν να στέλνουν δεδομένα, βασιζόμενος σε μια προσέγγιση TDMA. Κατά τη διάρκεια της σταθερής φάσης, οι κόμβοι αισθητήρων μπορούν να λαμβάνουν δεδομένα από το περιβάλλον και να τα εκπέμπουν προς τους cluster heads.

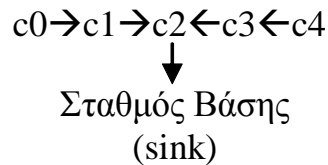
Το πρωτόκολλο LEACH επιτυγχάνει μείωση ως και 7 φορές στην κατανάλωση της ενέργειας σε σχέση με την απ' ευθείας μετάδοση και μείωση 4-8 φορές σε σχέση με την μέθοδο μετάδοσης της μικρότερης ενέργειας. Το LEACH χρησιμοποιεί δρομολόγηση single-hop, όπου ο κάθε κόμβος μπορεί να εκπέμψει κατευθείαν στον cluster head και στον sink. Το τελευταίο αποτελεί και μειονέκτημα, γιατί δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε δίκτυα που εγκαθίστανται σε μεγάλες περιοχές. Ένα άλλο πρόβλημα αποτελεί και η δυναμική αλλαγή των clusters που επιφέρει επιπλέον κατανάλωση ενέργειας λόγω αλλαγής του cluster head, της επιπλέον διαφήμισης κ.α.

3.3.2 PEGASIS & Ιεραρχικό PEGASIS

➤ PEGASIS (Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems)

Πρόκειται για μια βελτίωση του πρωτοκόλλου LEACH [21]. Η διαφορά του με το πρωτόκολλο LEACH είναι η χρήση δρομολόγησης multi-hop με την δημιουργία αλυσίδων και με την επιλογή ενός μόνο κόμβου που θα εκπέμψει προς το σταθμό βάσης (sink) αντί της χρήσης πολλαπλών κόμβων. Τα συλλεγμένα δεδομένα κινούνται από κόμβο σε κόμβο, αθροίζονται (aggregated) και τελικώς στέλνονται

προς τον sink. Η κατασκευή της αλυσίδας γίνεται με άπληστο τρόπο. Η λειτουργία του πρωτοκόλλου απεικονίζεται στην **Εικόνα 11**.



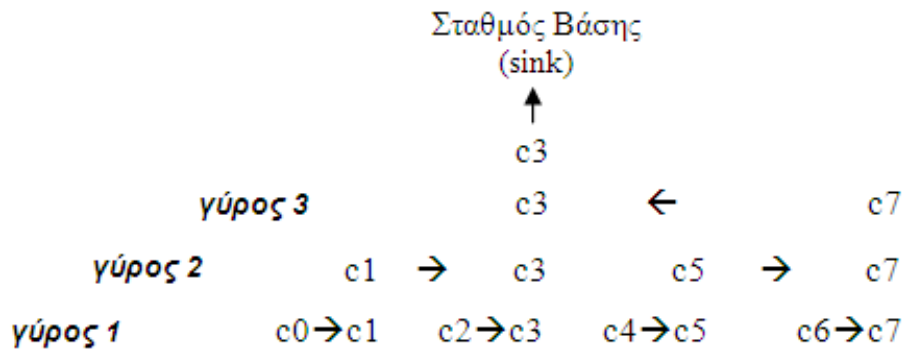
Εικόνα 11: Η αλυσίδα λειτουργίας του PEGASIS [Lindsey et al., 21].

Πλεονέκτημα του είναι ότι έχει αποδειχτεί ότι ξεπερνάει σε απόδοση το LEACH περίπου 100-300% για διάφορα μεγέθη δικτύου και διάφορες τοπολογίες. Μειονέκτημα του είναι ότι επιφέρει μεγάλη καθυστέρηση για απομακρυσμένους κόμβους στην αλυσίδα. Επίσης, όλη η κίνηση του δικτύου συνωστιάζεται στον μοναδικό αρχηγό της αλυσίδας γεγονός που επιφέρει μεγάλη καθυστέρηση στην μετάδοση των δεδομένων.

➤ **Ιεραρχικό PEGASIS**

Είναι μια επέκταση του απλού PEGASIS [22]. Προκειμένου να μειωθεί η καθυστέρηση και να προταθεί μια λύση στην συγκέντρωση των δεδομένων. Προκειμένου να αποφύγει συγκρούσεις και πιθανές παρεμβολές από κόμβους που εκπέμπουν σε κοντινή απόσταση έχουν ερευνηθεί 2 τεχνικές. Η 1^η μέθοδος αφορά την κωδικοποίηση του σήματος π.χ.CDMA, ενώ στη 2^η μπορούν να εκπέμπουν ταυτόχρονα μόνο οι κόμβοι που απέχουν ίση απόσταση.

Σύμφωνα με την πρώτη μέθοδο το βασισμένο σε αλυσίδα πρωτόκολλο (chain-based protocol) με κωδικοποίηση σήματος CDMA, κατασκευάζει μια αλυσίδα κόμβων που σχηματίζουν μια δένδροειδή ιεραρχία, και κάθε επιλεγμένος κόμβος στο κάθε επίπεδο στέλνει τα δεδομένα στον κόμβο στο επόμενο επίπεδο της ιεραρχίας. Αυτή η μέθοδος εγγυάται την αποστολή δεδομένων με παράλληλο τρόπο και μειώνει σημαντικά τις καθυστερήσεις. Η λειτουργία αυτή απεικονίζεται στην **Εικόνα 12**.



Εικόνα 12: Συγκέντρωση των δεδομένων με ένα δυαδικό τρόπο βασισμένο σε αλυσίδα [Lindsey et al., 22].

Η 2^η μέθοδος δημιουργεί μια ιεραρχία 3 επιπέδων (στους κόμβους) και οι παρεμβολές μειώνονται με προσεκτικό προγραμματισμό των ταυτόχρονων εκπομπών.

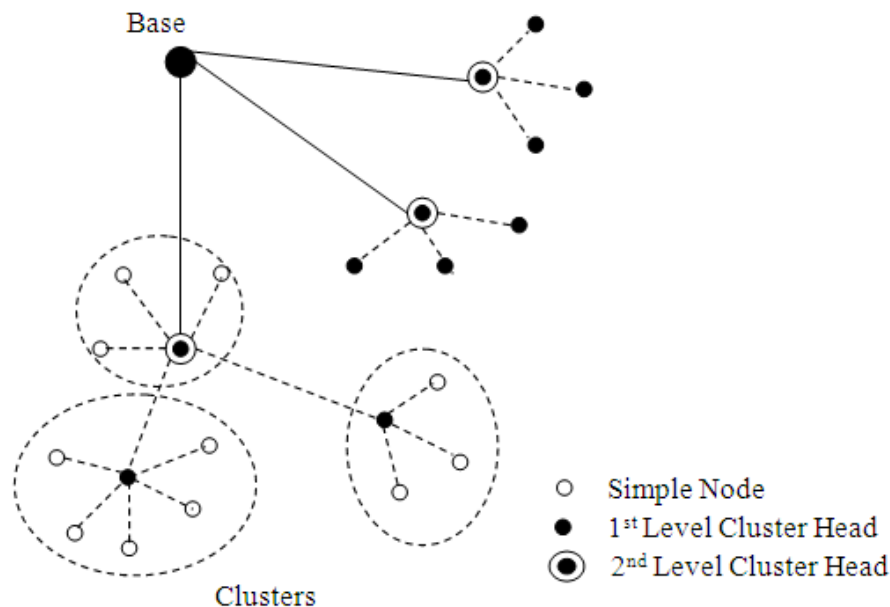
Το Ιεραρχικό PEGASIS έχει αποδειχτεί ότι λειτουργεί καλύτερα από ότι η απλή έκδοση κατά ένα παράγοντα 60%. Σε σχέση με το LEACH, το PEGASIS αποφεύγει το επιπλέον κόστος της ομαδοποίησης, αλλά απαιτεί δυναμική ρύθμιση της τοπολογίας καθώς δεν μπορεί να ανιχνευθεί η ενέργεια των αισθητήρων. Για παράδειγμα, κάθε κόμβος πρέπει να γνωρίζει την κατάσταση του γείτονά του, ώστε να ξέρει που θα δρομολογήσει τα δεδομένα. Τέτοια ρύθμιση στην τοπολογία μπορεί να επιφέρει μεγάλα έξοδα για υψηλώς χρησιμοποιούμενα δίκτυα.

3.3.3TEEN & APTEEN

➤ TEEN (Threshold Sensitive Energy Efficient Sensor Network protocol)

Σχεδιάστηκε για να ανταποκρίνεται σε ξαφνικές αλλαγές στα χαρακτηριστικά των παρατηρούμενων γεγονότων, όπως είναι η θερμοκρασία. Είναι σημαντικό να υπάρχει άμεση ανταπόκριση για εφαρμογές πραγματικού χρόνου [23]. Η αρχιτεκτονική του δικτύου αισθητήρων βασίζεται σε μια ιεραρχική ομαδοποίηση, όπου οι κοντινότεροι κόμβοι δημιουργούν clusters και αυτή η λειτουργία συνεχίζεται και σε 2^ο επίπεδο μέχρις ότου φθάσουμε στον sink. Το μοντέλο αυτό απεικονίζεται στην **Εικόνα 13**.

Χρησιμοποιεί 2 τιμές κατωφλίου την σκληρή και την μαλακή (hard and soft threshold) με αποτέλεσμα να έχουμε συνεχή παρακολούθηση του γεγονότος, αλλά και μείωση των εκπομπών και διατήρηση της ενέργειας. Το TEEN δεν εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που απαιτείται η λήψη δεδομένων περιοδικά, αφού υπάρχει περίπτωση να μην φθάσουμε ποτέ στην καθορισμένη τιμή κατωφλίου και άρα να μην αποσταλούν τα δεδομένα.



Εικόνα 13: Ιεραρχική ομαδοποίηση στο TEEN και στο APTEEN [Agrawal et al., 23].

➤ APTEEN (AdaPtive TEEN)

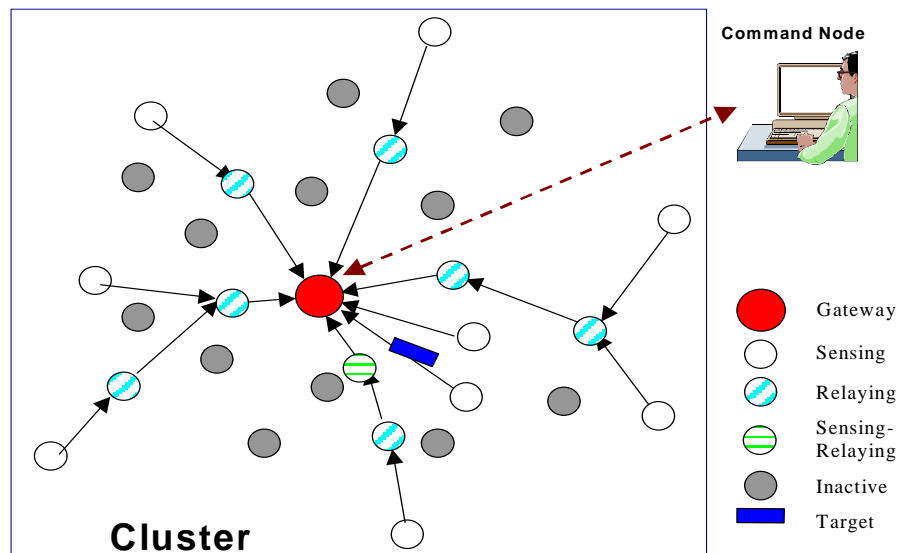
Πρόκειται για μια επέκταση του TEEN που στοχεύει στο να μπορεί να λειτουργήσει και για εφαρμογές λήψης δεδομένων περιοδικά και να αντιδρά σε χρήσιμα χρονικά γεγονότα [24]. Η χρησιμοποιούμενη αρχιτεκτονική είναι ίδια με του απλού TEEN. Σε σχέση με το απλό TEEN, υποστηρίζει 3 διαφορετικούς τύπους ερωτημάτων: 1) *ιστορικά*, για να αναλύσει παρελθοντικές τιμές δεδομένων, 2) *μιας χρονικής στιγμής*, για να λάβει μια άποψη των παρατηρούμενων γεγονότων εκείνη τη στιγμή και 3) *συνεχόμενων* για να παρακολουθήσει ένα γεγονός για συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Προσομοιώσεις έδειξαν ότι το TEEN και το APTEEN ξεπερνούν σε απόδοση το LEACH. Η απόδοση του APTEEN όσον αφορά στην κατανάλωση ενέργειας και στην ζωή του δικτύου, βρίσκεται μεταξύ του TEEN και του LEACH, με το TEEN να βρίσκεται στην κορυφή. Μειονεκτήματα αποτελούν το υψηλό κόστος και η αυξημένη πολυπλοκότητα της δημιουργίας ομάδων σε πολλαπλά επίπεδα, η υλοποίηση των εξισώσεων που βασίζονται στα κατώφλια καθώς και η υλοποίηση ερωτημάτων που βασίζονται σε ονοματοδοσία των χαρακτηριστικών.

3.3.4 Energy – Aware routing for cluster based sensor networks

Το πρωτόκολλο αυτό [6,12] αφορά σε ένα ιεραρχικό αλγόριθμο που εμπεριέχει επικεφαλείς ομάδων, γνωστές εξόδους (gateways) οι οποίες έχουν λιγότερους περιορισμούς στην ενέργεια από ότι οι αισθητήρες, και που υποθέτει ότι η θέση των αισθητήριων κόμβων είναι γνωστή. Οι gateways διατηρούν την κατάσταση των αισθητήρων και εγκαθιστούν μονοπάτια πολλαπλών αλμάτων για την συλλογή των αισθητήριων δεδομένων. Στο επίπεδο ζεύξης χρησιμοποιείται τεχνική TDMA. Η gateway πληροφορεί κάθε κόμβο για τις χρονοθυρίδες στις οποίες μπορεί να εκπέμψει και γι' αυτές που πρέπει να «ακούει». Ο sink που δίνει και τις εντολές επικοινωνεί μόνο με τις gateways.

Οι αισθητήρες μπορούν να λειτουργήσουν είτε σε ενεργή κατάσταση είτε σε κατάσταση αναμονής χαμηλής ενέργειας. Οι μονάδες αισθήσεως και επεξεργασίας του κόμβου μπορούν να τίθενται ή όχι σε λειτουργία. Επιπλέον, είναι δυνατόν να τίθενται εντός και εκτός λειτουργίας ο πομπός και ο δέκτης ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο, και να προγραμματίζεται η ενέργεια εκπομπής βασιζόμενη στην απαιτούμενη ακτίνα. Οι αισθητήριοι κόμβοι σε μια ομάδα (cluster) μπορούν να βρίσκονται σε μία εκ των καταστάσεων: αισθήσεως μόνο, αναμετάδοσης μόνο, αισθήσεως και αναμετάδοσης, και εκτός ενεργείας (inactive). Οι πρώτες τρεις λειτουργούν όπως και το όνομά τους προδίδει. Στην 4^η κατάσταση ο εκτός ενεργείας κόμβος μπορεί να θέσει εκτός λειτουργίας τα κυκλώματα αισθήσεως και επικοινωνίας. Στην **Εικόνα 14** φαίνεται ένα παράδειγμα των 4 καταστάσεων που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Μεταξύ δύο κόμβων ορίζεται μια συνάρτηση κόστους, που βασίζεται στην κατανάλωση ενέργειας, βελτιστοποίηση καθυστερήσεων, και άλλες μετρικές παραμέτρους απόδοσης. Από αυτή τη συνάρτηση εξάγεται το κόστος ζεύξης, το οποίο και χρησιμοποιείται για να βρεθεί το μονοπάτι με τη μικρότερη κατανάλωση ενέργειας (least-cost path), μεταξύ των αισθητήριων κόμβων και της gateway. Η τελευταία παρακολουθεί συνεχώς την εναπομένουσα ενέργεια σε κάθε ενεργό κόμβο που βρίσκεται σε μια εκ των 3 πρώτων καταστάσεων λειτουργίας (βλέπε παραπάνω). Επαναδρομολόγηση έχουμε όταν: 1) ένα συμβάν στην εφαρμογή απαιτεί διαφορετικό σύνολο αισθητήρων να συλλέξουν δεδομένα από το περιβάλλον και 2) όταν μια μπαταρία ενεργού κόμβου εξαντλείται.



Εικόνα 14: Μια τυπική ομάδα σε ένα δίκτυο αισθητήρων [Akkaya et al., 6].

Μια παραλλαγή της παραπάνω προσέγγισης αναφέρεται στο [12]**Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**, όπου ο αλγόριθμος περιορίζει (constrains) την ελάχιστη απόσταση εκπομπής με σκοπό να μειώσει την καθυστέρηση. Οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι ο αλγόριθμος συμπεριφέρεται αρκετά καλά όσον αφορά στην κατανάλωση ενέργειας και στην ζωή του δικτύου, αλλά και όσον αφορά στην καθυστέρηση διάδοσης και την διαμεταγωγή. Επίσης, ο συνδυασμός της δρομολόγησης με το TDMA του επιπέδου ζεύξης μπορεί να παρατείνει την επιπλέον τη ζωή του δικτύου κατά μία φορά. Μειονέκτημα είναι ότι μια τέτοια μέθοδος μπορεί να απαιτεί την εξάπλωση πολλών gateways και να εξασφαλιστεί η κάλυψη από αισθητήρες.

3.3.5 Self-organizing Protocol

Το πρωτόκολλο αυτό [25] υποστηρίζει μια διαφορετική αρχιτεκτονική για τη δημιουργία εφαρμογών, που υποστηρίζει ανομοιογενείς αισθητήρες που μπορούν να είναι είτε κινητοί είτε στάσιμοι. Κάποιοι κόμβοι εξετάζουν το περιβάλλον και προωθούν τα συλλεγμένα δεδομένα σε ένα σύνολο κόμβων που δρουν σαν δρομολογητές. Αυτοί οι κόμβοι είναι στάσιμοι και σχηματίζουν την ραχοκοκαλιά (backbone) για την επικοινωνία. Τα δεδομένα με αυτό τον τρόπο φθάνουν σε πιο ισχυρούς κόμβους συγκεντρωτές (more powerful sink nodes). Κάθε αισθητήριος κόμβος θα πρέπει να είναι σε ικανή απόσταση επικοινωνίας από ένα δρομολογητή προκειμένου να ανήκει στο δίκτυο. Οι αισθητήριοι κόμβοι είναι αναγνωρίσιμοι μέσω της διεύθυνσης των δρομολογητών με τους οποίους είναι

συνδεδεμένοι. Η αρχιτεκτονική δρομολόγησης είναι ιεραρχική με σχηματισμό ομάδων κόμβων και ένωση τους, όποτε αυτό είναι αναγκαίο. Προκειμένου να έχουμε αύξηση αντοχής σε λάθη χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Local Markov Loops LML.

Οι φάσεις λειτουργίας του αλγόριθμου είναι οι εξής :

- *Φάση Εύρεσης.* Ανακαλύπτονται οι γειτονικοί κόμβοι κάθε αισθητήριου κόμβου.
- *Φάση Οργάνωσης.* Δημιουργούνται ομάδες και ενώνονται για τον σχηματισμό μιας ιεραρχίας. Κάθε κόμβος έχει μια διεύθυνση που εξαρτάται από τη θέση του στην ιεραρχία. Δημιουργούνται πίνακες δρομολόγησης για κάθε κόμβο. Επίσης κατασκευάζονται δέντρα που εκτείνονται σε όλους τους κόμβους.
- *Φάση Συντήρησης.* Σε αυτή τη φάση λαμβάνει χώρα η ανανέωση των πινάκων δρομολόγησης καθώς και των επιπέδων εναπομένουσας ενέργειας. Κάθε κόμβος πληροφορεί το γείτονά του για τον πίνακα δρομολόγησής του και την εναπομένουσα ενέργειά του. Ο αλγόριθμος LML χρησιμοποιείται για να διατηρήσει τα δέντρα.
- *Φάση Αυτό-οργάνωσης.* Σε περίπτωση κομματιάσματος ή αστοχίας κάποιων κόμβων, εκτελείται αναδιοργάνωση των ομάδων.

Εφαρμογές του είναι μπορεί να είναι δίκτυα αισθητήρων που παρακολουθούν ένα Parking αυτοκινήτων εξαιτίας της δυνατότητας του να αναφέρεται σε συγκεκριμένους κόμβους. Το πλεονέκτημα του αλγορίθμου είναι το μικρό κόστος της διατήρησης των πινάκων δρομολόγησης και η ισορροπημένη ιεραρχία της δρομολόγησης. Επιπλέον, η ενέργεια για την αποστολή ενός καθολικού μηνύματος είναι μικρότερη από αυτήν που απαιτείται στο πρωτόκολλο SPIN εξαιτίας των δέντρων που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος. Επίσης, η αντοχή σε λάθη είναι αυξημένη λόγω του LML αλγορίθμου που εφαρμόζεται σε δέντρα. Μειονεκτήματα είναι η φάση της οργάνωσης που επιφέρει ένα επιπλέον κόστος αφού δεν γίνεται κατ' απαίτηση, και η φάση υλοποίησης της ιεραρχίας όταν υπάρχουν πολλά κοψίματα στο δίκτυο οπότε και μπορεί να χρειαστεί να εκτελεστεί η φάση της αυτό-οργάνωσης.

3.3 Πρωτόκολλα δρομολόγησης βασισμένα στη θέση

Σε αυτή την κατηγορία πρωτοκόλλων δρομολόγησης όποιος θέλει να επικοινωνήσει με τους κόμβους το κάνει σε σχέση με την τοποθεσία τους. Η απόσταση μεταξύ των γειτονικών κόμβων μπορεί να εκτιμηθεί με βάση την ισχύ των εισερχόμενων σημάτων. Ανταλλάσσοντας αυτού του είδους την πληροφορία οι γειτονικοί κόμβοι μπορούν να αποκτήσουν παραπλήσιες συντεταγμένες. Εναλλακτικά, η θέση των κόμβων μπορεί να είναι διαθέσιμη απευθείας μέσω επικοινωνίας με δορυφόρο που χρησιμοποιεί GPS, εάν οι κόμβοι

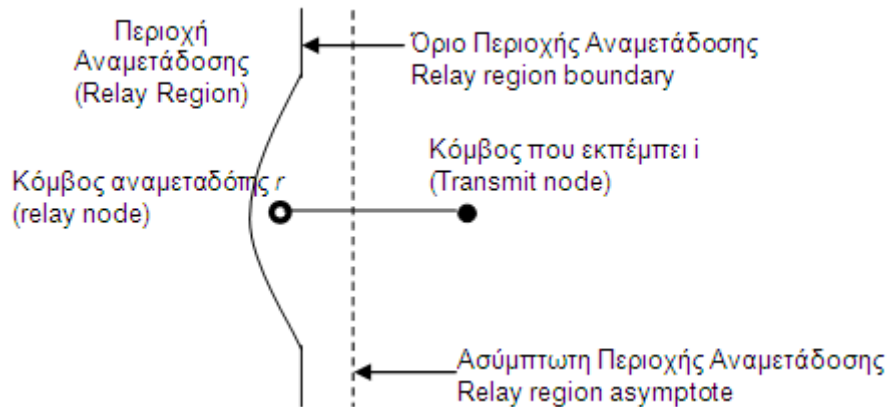
είναι εξοπλισμένοι με χαμηλής ισχύος GPS δέκτη. Για εξοικονόμηση ενέργειας χρησιμοποιείται σε αρκετά σχήματα η περιοδική sleep λειτουργία των κόμβων, δηλαδή οι κόμβοι περιοδικά να είναι εκτός λειτουργίας και κάποιες φορές θέλουμε όσο το δυνατόν πιο πολλοί κόμβοι να βρίσκονται στην κατάσταση αυτή.

3.4.1 MECN & SMECN

➤ MECN (Minimum Energy Communication Network)

Φτιάχνει και διατηρεί ένα δίκτυο ελάχιστης ενέργειας για ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιώντας ένα χαμηλής ισχύος GPS [26]. Το MECN βρίσκει μια περιοχή αναμετάδοσης (relay region) για κάθε κόμβο. Αυτή η περιοχή αποτελείται από κόμβους στην γύρω από τον κόμβο περιοχή, μέσω των οποίων η μετάδοση είναι πιο αποτελεσματική ενεργειακά, από ότι η απ' ευθείας μετάδοση. Η περιοχή αναμετάδοσης για ένα ζευγάρι κόμβων (i, r) απεικονίζεται στην **Εικόνα 15**. Στη συνέχεια δημιουργείται η «εμβέλεια» του κόμβου i από τις ενώσεις όλων των περιοχών αναμετάδοσης τις οποίες μπορεί να φθάσει ο κόμβος i . Η κύρια ιδέα του MECN είναι η εύρεση ενός υποδικτύου, το οποίο έχει μικρότερο αριθμό κόμβων και απαιτεί λιγότερη ενέργεια για εκπομπή μεταξύ δύο οποιοδήποτε κόμβων. Με αυτόν τον τρόπο κατασκευάζονται μονοπάτια ελάχιστης ενέργειας, χωρίς να λαμβάνει υπόψη όλους τους κόμβους του δικτύου. Αυτό είναι δυνατόν χρησιμοποιώντας μια τοπική έρευνα για κάθε κόμβο λαμβάνοντας υπόψη την περιοχή αναμετάδοσης του. Το πρωτόκολλο έχει 2 φάσεις :

- Λαμβάνει τις θέσεις ενός επιπέδου 2 διαστάσεων και κατασκευάζει μια αραιή γραφική παράσταση (enclosure graph), που αποτελείται από όλες τις εμβέλειες κάθε ενός κόμβου που εκπέμπει. Αυτό απαιτεί τοπικούς υπολογισμούς εντός των κόμβων. Το enclosure graph περιλαμβάνει καθολικές βέλτιστες συνδέσεις όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας.
- Βρίσκει τα βέλτιστα μονοπάτια εντός του γράφου. Χρησιμοποιεί τον κατανεμημένο αλγόριθμο Belmann-Ford της συντομότερης διαδρομής με μέτρο την κατανάλωση ενέργειας. Σε περίπτωση κινητικότητας οι συντεταγμένες της θέσης ενημερώνονται μέσω του GPS.



Εικόνα 15: Περιοχή αναμετάδοσης ενός ζευγαριού κόμβων πομπού - αναμεταδότη (i,r) στο MECN [Rodoplu et al., 26].

Το MECN είναι αυτορρυθμιζόμενο και έτσι μπορεί δυναμικά να προσαρμοστεί σε αποτυχίες κάποιων κόμβων ή στην εξάπλωση νέων κόμβων.

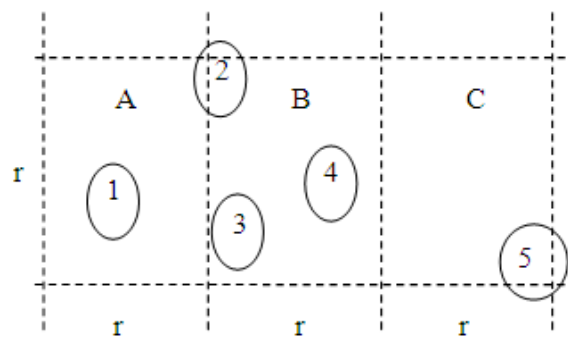
➤ SMECN (Small MECN)

Είναι μια επέκταση του MECN [27]. Στο MECN δεν είναι δυνατόν κάθε κόμβος να εκπέμπει σε άλλον κόμβο κάθε στιγμή. Το SMECN υποθέτει ότι μπορεί να υπάρχουν πιθανά εμπόδια μεταξύ των κόμβων, αλλά ότι το δίκτυο παραμένει πλήρως συνδεδεμένο. Το υποδίκτυο που κατασκευάζεται από το SMECN είναι μικρότερο από ότι στο MECN με την προϋπόθεση ότι μια καθολική εκπομπή είναι ικανή να φτάσει προς όλους τους κόμβους σε μια κυκλική περιοχή γύρω από τον κόμβο που εκπέμπει προς όλους. Αποτέλεσμα είναι ο αριθμός των αλμάτων για επικοινωνία να είναι μειωμένος. Αποτελέσματα προσομοίωσης έδειξαν ότι το SMECN χρησιμοποιεί λιγότερη ενέργεια από το MECN και το κόστος συντήρησης των δεσμών είναι μικρότερο. Το μειονέκτημά του είναι ότι το να βρεις ένα υποδίκτυο με μικρότερο αριθμό άκρων εισάγει επιπλέον κόστος στον αλγόριθμο.

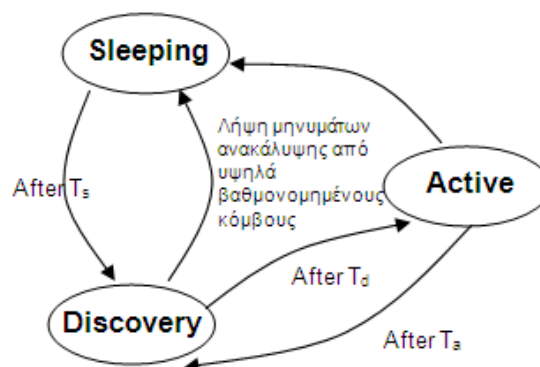
3.4.2 GAF (Geographical Adaptive Fidelity)

Είναι ένας αλγόριθμός δρομολόγησης που λαμβάνει υπόψη την ενέργεια που καταναλώνεται και την θέση που βρίσκεται ο αισθητήρας, ο οποίος σχεδιάστηκε αρχικά για κινούμενα ad-hoc δίκτυα, αλλά μπορεί να εφαρμοστεί και σε δίκτυα αισθητήρων [28]. Το GAF διατηρεί την ενέργεια θέτοντας εκτός λειτουργίας τους μη αναγκαίους κόμβους του δικτύου χωρίς όμως να επηρεάζει το επίπεδο πιστότητας της δρομολόγησης. Δημιουργεί ένα εικονικό πλέγμα της καλυπτόμενης περιοχής. Οι κόμβοι που ανήκουν στο ίδιο σημείο στο πλέγμα θεωρούνται ισοδύναμοι χρησιμοποιώντας ως μέτρο την ενέργεια που καταναλώνεται για την δρομολόγηση ενός πακέτου. Έτσι, μόνο ένας κόμβος από όλους μένει ενεργός σε κάθε σημείο του πλέγματος, ενώ όλοι οι υπόλοιποι τίθενται εκτός λειτουργίας.

Στην **Εικόνα 16** απεικονίζεται ένα δίκτυο στο οποίο οι κόμβοι 2,3,4 θεωρούνται ισοδύναμοι, γιατί ο κόμβος 1 μπορεί να φθάσει οποιονδήποτε από τους τρεις και επιπλέον οι κόμβοι 2,3,4 μπορούν να φθάσουν τον κόμβο 5.



Εικόνα 16: Παράδειγμα ενός εικονικού πλέγματος στο GAF [Y.Xu et al., 28].



Εικόνα 17: Αλλαγές κατάστασης στο GAF [Y.Xu et al., 28].

Οι κόμβοι στο πρωτόκολλο GAF αλλάζουν την κατάσταση τους από μη ενεργοί (sleeping) σε ενεργούς (active), έτσι ώστε το φορτίο να είναι ισορροπημένο. Οι κόμβοι

μπορούν να βρίσκονται σε 3 καταστάσεις, όπως το πρωτόκολλο ορίζει. Αυτές είναι: α) *Ανακάλυψης (discovery)*: όπου βρίσκονται οι γείτονες στο πλέγμα, β) *Ενεργή (active)* που αντιπροσωπεύει την συμμετοχή στην δρομολόγηση και γ) *Μη ενεργή (sleep)* όπου ο ασύρματος είναι εκτός λειτουργίας. Στην **Εικόνα 17** απεικονίζονται οι αλλαγές στην κατάσταση ενός κόμβου. Η εκάστοτε εφαρμογή είναι αυτή που αποφασίζει για το ποιος και το πόσο ένας κόμβος θα βρίσκεται εκτός λειτουργίας (sleep state). Προκειμένου να μπορεί να χειριστεί την κινητικότητα το GAF κάθε κόμβος στο πλέγμα υπολογίζει το χρόνο αποχώρησης του και ενημερώνει τους γείτονές του. Οι μη ενεργοί γείτονες ρυθμίζουν ανάλογα τη διάρκεια που θα είναι σε μη ενεργή κατάσταση, προκειμένου να διατηρηθεί η αξιοπιστία της δρομολόγησης. Πριν την αποχώρηση ενός ενεργού κόμβου, οι ανενεργοί κόμβοι γίνονται ενεργοί και ένας από αυτούς παραμένει σε αυτήν την κατάσταση, ενώ οι υπόλοιποι επανέρχονται στην προηγούμενη (ανενεργή κατάσταση).

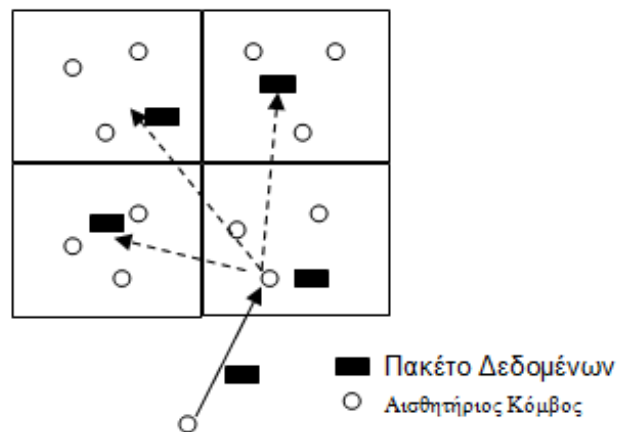
Το GAF αγωνίζεται προκειμένου να κρατήσει το δίκτυο συνδεδεμένο τηρώντας ένα αντιπροσωπευτικό κόμβο σε ενεργή κατάσταση για κάθε περιοχή μέσα στο πλέγμα. Αποτελέσματα προσομοίωσης έδειξαν ότι το GAF λειτουργεί το ίδιο καλά σαν ένα κανονικό πρωτόκολλο δρομολόγησης ad-hoc όσον αφορά στην καθυστέρηση και στην απώλεια πακέτων, ενώ αυξάνει και την ζωή του δικτύου με την εξοικονόμηση της ενέργειας. Παρόλο ότι είναι πρωτόκολλο που βασίζεται στη θέση των αισθητήρων (location-based protocol) , μπορεί επίσης να θεωρηθεί και σαν ιεραρχικό πρωτόκολλο όπου η δημιουργία των clusters βασίζεται στην γεωγραφική θέση. Σε κάθε περιοχή ο αντιπροσωπευτικός κόμβος λειτουργεί σαν αρχηγός της ομάδας που εκπέμπει τα δεδομένα στους άλλους κόμβους. Η διαφορά είναι ότι στο GAF ο κόμβος αυτός δεν εκτελεί οποιαδήποτε άθροιση ή διάχυση των δεδομένων, όπως στην περίπτωση των άλλων ιεραρχικών πρωτοκόλλων.

3.4.3 GEAR (Geografically and Energy Aware Routing)

Το πρωτόκολλο αυτό χρησιμοποιεί πληροφορίες ενέργειας και θέσης των γειτονικών κόμβων για να δρομολογήσει τα πακέτα προς την περιοχή του στόχου. Σκοπός είναι να μειωθεί ο αριθμός των ενδιαφερόμενων κόμβων όπως συμβαίνει με την δρομολόγηση Directed Diffusion, χρησιμοποιώντας μια μόνο περιοχή για αποστολή των μηνυμάτων , από το να στέλνει το ενδιαφέρον σε όλο το δίκτυο. Το GEAR [29] με αυτόν τον τρόπο συμπληρώνει το πρωτόκολλο Directed Diffusion καταναλώνοντας λιγότερη ενέργεια.

Στο GEAR κάθε κόμβος διατηρεί μια πληροφορία για το κόστος που απαιτείται (με μέτρο την καταναλισκόμενη ενέργεια) για να φθάσει ένα πακέτο στον προορισμό του μέσω των γειτόνων του. Αυτή η πληροφορία περιλαμβάνει 2 κόστη α) ένα *εκτιμώμενο κόστος*

(estimated cost) και β) ένα γνωστό κόστος το οποίο μαθαίνεται (learning cost). Το εκτιμώμενο κόστος (estimated cost) υπολογίζεται από το συνδυασμό της υπάρχουσας ενέργειας στον κόμβο και της απόστασης μέχρι τον προορισμό. Το γνωστό κόστος (learned cost) υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη εκτός από το εκτιμώμενο κόστος (estimated cost) και τη δρομολόγηση γύρω από τυχόν κενά (holes) του δικτύου. Ένα κενό (hole) στο δίκτυο δημιουργείται όταν ένας κόμβος δεν έχει κάποιον άλλον πλησιέστερο γείτονα προς την περιοχή του στόχου παρά μόνο τον εαυτό του. Σε περίπτωση που δεν υπάρχουν τρύπες (holes) στο δίκτυο τότε το εκτιμώμενο κόστος (estimated cost) είναι ίδιο με το γνωστό (learned cost). Το γνωστό κόστος διαδίδεται κάθε φορά ένα άλμα προς τα πίσω, κάθε φορά που ένα πακέτο φθάνει στον προορισμό του, έτσι ώστε να ρυθμιστεί η εγκατάσταση του δρομολογίου (route setup-up) για το επόμενο πακέτο.



Εικόνα 18: Αναδρομική γεωγραφική δρομολόγηση στο GEAR [Y. Yu et al.,29]

Υπάρχουν δύο φάσεις στον αλγόριθμο :

- *Πρωώθηση πακέτων προς την περιοχή του στόχου:* Όταν ένας κόμβος λαμβάνει ένα πακέτο, ελέγχει αν κάποιος από τους γείτονές του είναι πιο κοντά στον στόχο από τον ίδιο. Αν υπάρχουν περισσότεροι από ένας, επιλέγεται ο κοντινότερος. Αν δεν υπάρχει κανείς κοντύτερα στην περιοχή του στόχου, τότε δημιουργείται το φαινόμενο της τρύπας. Τότε επιλέγεται κάποιος από τους γείτονες για να προωθήσει το πακέτο βασισμένος στην μαθησιακή συνάρτηση. Αυτή η επιλογή μπορεί μετά να ανανεωθεί καθώς τα μαθησιακά κόστη συγκλίνουν κατά την παράδοση του πακέτου.
- *Πρωώθηση των πακέτων μέσα στην περιοχή του στόχου:* αν το πακέτο φθάσει στην περιοχή του στόχου, τότε μπορεί να διαχυθεί είτε με αναδρομική γεωγραφική προώθηση είτε με περιορισμένη διάχυση (flooding). Η τελευταία μέθοδος είναι καλή όταν οι αισθητήρες δεν είναι εγκατεστημένοι πυκνά. Σε διαφορετική περίπτωση χρησιμοποιείται η πρώτη μέθοδος και η περιοχή του στόχου χωρίζεται σε 4 υπο-περιοχές και δημιουργούνται 4 αντίγραφα του πακέτου. Αυτός ο διαμοιρασμός

συνεχίζεται μέχρις ότου μείνει η υπό-περιοχή με ένα κόμβο. Ένα παράδειγμα απεικονίζεται στην **Εικόνα 18**.

Το GEAR συγκρίνεται με το GPSR το οποίο χρησιμοποιεί ένα δυσδιάστατο γράφο για να λύσει το πρόβλημα με τις τρύπες στο δίκτυο. Προσομοιώσεις όμως έδειξαν ότι το GEAR λειτουργεί καλύτερα γιατί όχι μόνο μειώνει την κατανάλωση της ενέργειας για την εγκαθίδρυση της διαδρομής αλλά λειτουργεί πιο αποτελεσματικά στην παράδοση των πακέτων. Έτσι, για ανομοιόμορφη κίνηση το GEAR παραδίδει 70-80% περισσότερα πακέτα από το GPSR και για ομοιόμορφη κίνηση παραδίδει 2-35% περισσότερα πακέτα.

3.4.4 Τεχνικές εύρεσης θέσης

Οι τρεις βασικές τεχνικές για εύρεση της θέσης είναι ο τριγωνισμός (triangulation), η ανάλυση του σκηνικού (scene analysis) και η εγγύτητα (proximity). [29][30][31][32]

➤ *Τριγωνισμός (Triangulation)*

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί τις γεωμετρικές ιδιότητες των τριγώνων για να υπολογίσει τις θέσεις των αντικειμένων. Οι δύο μεγάλες κατηγορίες τριγωνισμού είναι το lateration που χρησιμοποιεί μέτρηση αποστάσεων, και γωνιακή θέση (angulation) που χρησιμοποιεί μέτρηση γωνιών ή αζιμουθίων (bearing measurement).

○ *Lateration*

Προκειμένου να βρεθεί η θέση ενός αντικειμένου πρέπει να μετρηθούν οι αποστάσεις από πολλαπλά γνωστά σημεία ή σημεία αναφοράς. Προκειμένου να βρεθεί η θέση σε 2 διαστάσεις απαιτείται η μέτρηση αποστάσεων από 3 μη ομοαξονικά σημεία, ενώ για εύρεση θέσης σε 3 διαστάσεις απαιτούνται 4 μη ομοεπίπεδα σημεία. Είναι δυνατόν αυτά τα σημεία να μειωθούν με τη βοήθεια ενός συστήματος εύρεσης θέσης χρησιμοποιώντας χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος.

Γενικά χρησιμοποιούνται 3 τεχνικές για την μέτρηση αποστάσεων.

1. *Απευθείας*. Αυτό γίνεται με τη χρήση μια φυσικής πράξης ή κίνησης. Για παράδειγμα ένα ρομπότ μπορεί να μετρήσει μια απόσταση εκτείνοντας ένα μεταλλικό άκρο μέχρι να έχει φυσική επαφή με το προς μέτρηση αντικείμενο.
2. *Χρόνος «Πτήσης» (Time-of-Flight)*. Είναι τεχνική που βασίζεται στο χρόνο και μετρά το χρόνο άφιξης ή τη διαφορά μεταξύ των χρόνων άφιξης σημάτων. Πιο αναλυτικά

για τη μέτρηση της απόστασης μεταξύ ενός αντικειμένου και ενός σημείου P, μετρίεται ο χρόνος που απαιτείται για να ταξιδέψει ένα σήμα με γνωστή ταχύτητα μεταξύ των 2 αυτών σημείων. Σήματα που μπορεί να χρησιμοποιούνται είναι είτε ο ήχος είτε το φως και τα ραδιοκύματα τα οποία όμως απαιτούν μεγάλη ακρίβεια στις μετρήσεις, λόγω της ταχύτητας διάδοσης. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι σε τέτοιου είδους μετρήσεων θα πρέπει να ληφθεί υπόψη, ότι μπορεί το σήμα λόγω πολυδιαδούσεων να φτάσει στο δέκτη και από διαφορετική, μη άμεση, διαδρομή. Επίσης, ένα άλλο θέμα που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η συμφωνία σε ότι αφορά στο χρόνο. Μπορεί το αντικείμενο και το σημείο P να έχουν διαφορετική αντίληψη για το χρόνο με αποτέλεσμα αν το αντικείμενο βασίζει την μέτρηση στο χρόνο του σημείου P, να εκτιμά τελικά λάθος την απόσταση. Αν βέβαια το αντικείμενο είναι αυτό που εκπέμπει και λαμβάνει την αντανάκλαση του σήματος τότε είναι στην απόλυτη ευθύνη του να μετρήσει την απόσταση, ανάλογα και με την ακρίβεια των οργάνων που διαθέτει. Τη χρήση της τεχνικής αυτής τη χρησιμοποιούν αρκετά συστήματα όπως το GPS, Active Bat, Cricket **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.** κ.α.

3. *Εξασθένιση (Attenuation)*. Η τεχνική αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι η ένταση ενός εκππεμπόμενου σήματος μειώνεται καθώς η απόσταση από το σημείο εκπομπής αυξάνεται. Αναφέρεται στην βιβλιογραφία και ως *Received Signal Strength Indicator (RSSI)* [30]. Αν δοθεί μια συνάρτηση που συνδέει την εξασθένιση με την απόσταση για κάποιον συγκεκριμένο τύπο εκπομπής, και είναι γνωστή η ένταση του εκππεμπόμενου σήματος, είναι δυνατόν να μετρηθεί η απόσταση ενός αντικειμένου από ένα σημείο P. Σε περιβάλλοντα με πολλά εμπόδια η χρήση αυτής της τεχνικής είναι συνήθως λιγότερο ακριβής από ότι η προαναφερθείσα μέθοδος του χρόνου «πτήσης». Τα προβλήματα διάδοσης όπως οι ανακλάσεις και η πολυδιαόδευση κάνουν δύσκολη την σύνδεση της εξασθένισης και της απόστασης, με αποτέλεσμα να έχουμε ανακριβείς εκτιμήσεις της απόστασης μεταξύ των σημείων. Βέβαια αυτό στα δίκτυα αισθητήρων δεν είναι υπαρκτό ως πρόβλημα αρκεί να έχουμε μεγάλη πυκνότητα στην εγκατάσταση τους. Ίσως σαν τεχνική να είναι καλύτερη από ότι η προηγούμενη αφού δεν χρειάζεται γνώση του χρόνου του ενός από τον άλλο κόμβο και απαιτείται μόνο μία εκπομπή από τον έναν και μία λήψη από τον άλλο, προκειμένου να βρεθεί η θέση. Το σύστημα SpotON χρησιμοποιεί αυτή την τεχνική.

- *Angulation*

Πρόκειται για παρόμοια τεχνική με την lateration μόνο που αντί για αποστάσεις μετρώνται γωνίες, προκειμένου να βρεθεί η θέση ενός αντικειμένου. Συνήθως, απαιτείται η

μέτρηση 2 γωνιών και μιας απόστασης για εύρεση θέσης σε 2 διαστάσεις ενώ για τις 3 διαστάσεις χρειάζεται επιπρόσθετα και η μέτρηση ενός αζιμουθίου. Συνήθως, σε αυτή την τεχνική, χρησιμοποιείται και ένα άνυσμα αναφοράς (π.χ. ο μαγνητικός βορράς) ως η θέση 0°. Στην βιβλιογραφία η τεχνική ονομάζεται και *angle of arrival (AoA)*.

Οι πολλαπλές κεραίες με διαφορετική φάση είναι μια τεχνολογία στην οποία εφαρμόζεται η τεχνική. Οι πολλαπλές κεραίες μετρούν το χρόνο άφιξης του σήματος. Έχοντας γνωστά τις διαφορετικές χρονικές στιγμές που το σήμα έφτασε στις διαφορετικές κεραίες καθώς και την γωνία λήψης κάθε κεραίας, είναι δυνατόν να βρεθεί η γωνία με την οποία εκπέμφθηκε το σήμα. Άλλο σύστημα που χρησιμοποιεί την τεχνική είναι το VHF Omnidirectional Ranging (VOR) για την ναυσιπλοΐα των αεροσκαφών.

➤ **Ανάλυση του πεδίου (Scene Analysis)**

Σύμφωνα με την τεχνική αυτή χρησιμοποιώντας τα χαρακτηριστικά ενός περιβάλλοντος που παρατηρήθηκαν από κάποιο κατάλληλα επιλεγμένο σημείο, είναι δυνατόν να εξαχθούν συμπεράσματα για την θέση του παρατηρητή ή των αντικειμένων στο περιβάλλον. Συνήθως τα παρατηρούμενα περιβάλλοντα απλοποιούνται προκειμένου να είναι εύκολο να αναπαρασταθούν και να συγκριθούν (**Εικόνα 19**).

Στα *στατικά* περιβάλλοντα η ανάλυση του πεδίου βασίζεται σε προσχεδιασμένα σύνολα αντικειμένων που έχουν παρατηρηθεί και έχουν αναπαρασταθεί σε τοποθεσίες αντικειμένων. Σε αντίθεση στα *δυναμικά* περιβάλλοντα η ανάλυση του πεδίου παρακολουθεί τις διαφορές μεταξύ των διαδοχικών σκηνών προκειμένου να κάνει εκτίμηση της τοποθεσίας. Οι διαφορές στο πεδίο ανταποκρίνονται στον τρόπο που ο παρατηρητής βλέπει το περιβάλλον καθώς αυτός κινείται. Αν υπάρχουν κάποια χαρακτηριστικά σημεία των οποίων οι θέσεις είναι γνωστές, ο παρατηρητής μπορεί να υπολογίσει τη θέση του σε σχέση με αυτά.

Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι η θέση των αντικειμένων μπορεί να συναχθεί χρησιμοποιώντας παθητική παρατήρηση και τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος, χωρίς να είναι αναγκαία η χρήση γεωμετρικών αποστάσεων και γωνιών. Σε περίπτωση που γίνει κάποια αλλαγή στα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος συνήθως αναγκαία είναι η επανάκτηση κάποιων σημείων του συνόλου ή ανάκτηση ενός καινούριου συνόλου σημείων. Ένα σύστημα που χρησιμοποιεί την τεχνική αυτή είναι το RADAR.



Εικόνα 19: Σχήμα του ορίζοντα όπως φαίνεται από μία κάμερα

➤ **Εγγύτητα (Proximity)**

Η συγκεκριμένη τεχνική απαιτεί την ανίχνευση της παρουσίας ενός αντικειμένου με τη χρήση ενός φυσικού φαινομένου περιορισμένης ακτίνας. Υπάρχουν 3 διαφορετικές προσεγγίσεις γι' αυτή την τεχνική:

- *Ανίχνευση φυσικής επαφής.* Είναι η πιο βασική τεχνική και χρησιμοποιεί αισθητήρες πίεσης, αίσθησης και ανιχνευτές χώρου.
- *Παρακολούθηση ασύρματων κυψελωτών σημείων πρόσβασης.* Συνήθως, χρησιμοποιείται στα κινητά τηλέφωνα χωρίς να αποκλείει τη χρήση της από δίκτυα αισθητήρων. Ο τρόπος λειτουργίας είναι ανίχνευση της κινητής συσκευής όταν αυτή εισέρχεται στην ακτίνα κάλυψης της κυψέλης.
- *Παρακολούθηση συστημάτων αυτόματου αριθμού αναγνώρισης (automatic ID systems).* Όπως προδίδει και η ονομασία η εύρεση της θέσης χρησιμοποιεί συστήματα αυτόματης αναγνώρισης όπως τερματικά συναλλαγών με πιστωτικές κάρτες.

Συνήθως, τέτοια συστήματα αναγνώρισης θέσης με χρήση της εγγύτητας μπορεί να χρειάζεται να συνδυαστούν με κάποιο σύστημα αναγνώρισης, αν δεν διαθέτουν τέτοια δυνατότητα.

3.5 Πρωτόκολλα δρομολόγησης βασισμένα στη ροή του δικτύου και στην ποιότητα της υπηρεσίας

Αν και τα περισσότερα πρωτόκολλα ανταποκρίνονται στην κατάταξη των προηγούμενων παραγράφων (§3.2 έως και §3.4), υπάρχουν και κάποια που απαιτούν διαφορετική κατάταξη, όπως η ροή του δικτύου και η ποιότητα υπηρεσίας. Σε κάποιες προσεγγίσεις, η εγκατάσταση μιας διαδρομής μοντελοποιείται και επιλύεται σαν πρόβλημα ροής του δικτύου. Τα πρωτόκολλα που είναι βασισμένα στην ποιότητα της υπηρεσίας λαμβάνουν υπόψη τις απαιτήσεις σε καθυστέρηση, ενώ εγκαθιστούν μονοπάτια μέσα στο δίκτυο.

3.5.1 Maximun lifetime energy routing

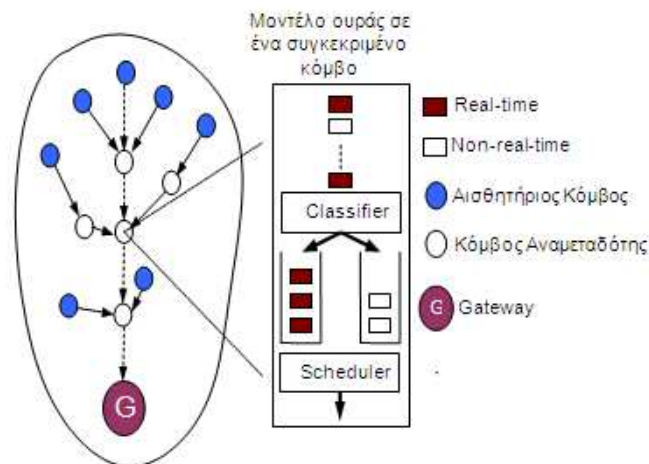
Είναι πρωτόκολλο δρομολόγησης που αφορά στην ροή του δικτύου [6]. Ο κύριος σκοπός αυτής της προσέγγισης είναι να μεγιστοποιηθεί η διάρκεια ζωής του δικτύου με τον προσεκτικό σχεδιασμό του κόστους ζεύξης σαν συνάρτηση της εναπομένουσας ενέργειας του κόμβου και της απαιτούμενης ενέργειας εκπομπής χρησιμοποιώντας αυτή τη ζεύξη. Από εκεί προέρχεται και το όνομα του πρωτοκόλλου. Υπάρχουν δύο αλγόριθμοι που υπολογίζουν την μέγιστη εναπομένουσα ενέργεια. Οι δύο αυτοί αλγόριθμοι διαφέρουν στον ορισμό του κόστους της ζεύξης και στο ενσωματωμένο κόστος της εναπομένουσας ενέργειας. Αντί να χρησιμοποιηθεί το κόστος e_{ij} , που είναι η ενέργεια που καταναλώνεται όταν ένα πακέτο εκπέμπεται στην ζεύξη $i-j$, χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα κόστη :

$$c_{ij} = \frac{1}{\underline{E}_i - e_{ij}} \quad \text{και} \quad c_{ij} = \frac{e_{ij}}{\underline{E}_i} \quad (3.2)$$

όπου \underline{E}_i είναι η εναπομένουσα ενέργεια του κόμβου.

Χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Bellman-Ford της συντομότερης διαδρομής για τα παραπάνω κόστη, βρίσκουμε τα ελάχιστα κόστη των μονοπατιών προς τον προορισμό (gateway). Το επιλεγόμενο μονοπάτι με το ελάχιστο κόστος είναι αυτό με τη μεγαλύτερη εναπομένουσα ενέργεια των κόμβων. Οι αλγόριθμοι αυτοί μπορούν να συγκριθούν με τον αλγόριθμο της ελάχιστης εκπεμπόμενης ενέργειας (Minimum Transmitted Energy MTE) πλην όμως, οι πρώτοι έχουν καλύτερη απόδοση όσον αφορά στην διάρκεια ζωής του δικτύου από τον τελευταίο.

3.5.2 Energy Aware QoS Routing Protocol



Εικόνα 20: Μοντέλο ερωτημάτων σε ένα κόμβο [Akkaya et al., 6].

Πρόκειται για ένα σχετικά νέο πρωτόκολλο [6,9] το οποίο βρίσκει ένα μονοπάτι το οποίο έχει το μικρότερο κόστος και είναι και αποτελεσματικό ενεργειακά, ενώ ταυτόχρονα εγγυάται συγκεκριμένη καθυστέρηση από άκρη σε άκρη. Το κόστος της ζεύξης που χρησιμοποιείται είναι μια συνάρτηση που λαμβάνει υπόψη την εναπομένουσα ενέργεια του κόμβου, την ενέργεια εκπομπής, τον ρυθμό των λαθών και άλλες επικοινωνιακές παραμέτρους.

Προκειμένου να έχουμε ταυτόχρονα κίνηση με την καλύτερη προσπάθεια και πραγματικού χρόνου κίνηση, χρησιμοποιείται ένα μοντέλο ταξινόμησης ουράς. Το μοντέλο αυτό επιτρέπει την ταξινόμηση της κίνησης σε ροή πραγματικού και μη χρόνου. Ο λόγος r του εύρους ζώνης, ορίζεται σε μια αρχική τιμή καθοριζόμενη από τον κόμβο gateway και αναπαριστά το μέγεθος του εύρους ζώνης που θα αφιερωθεί στην κίνηση πραγματικού και μη χρόνου. Το μοντέλο αυτό απεικονίζεται στην **Εικόνα 20**. Το πρωτόκολλο βρίσκει το καλύτερο μονοπάτι χρησιμοποιώντας μια εκτεταμένη έκδοση του Dijkstra. Ως καλύτερο μονοπάτι επιλέγεται αυτό που ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις που έχουν τεθεί όσον αφορά στην καθυστέρηση.

3.5.3 Maximun lifetime data gathering

Ένας άλλος προτεινόμενος αλγόριθμος [33] αναφέρεται στη μέγιστη ζωή του δικτύου για τη συλλογή δεδομένων. Η ζωή « T » του συστήματος ορίζεται ως ο αριθμός των γύρων ή των περιοδικών λήψεων δεδομένων από τους αισθητήρες μέχρις ότου βγει εκτός λειτουργίας ο πρώτος αισθητήρας. Ένας αλγόριθμος που βασίζεται στα παραπάνω είναι ο «Συγκερασμός Δεδομένων για μέγιστη ζωή» (Maximum Lifetime Data Aggregation MLDA).Ο

αλγόριθμος θεωρεί ότι γίνεται συγκερασμός των δεδομένων (data aggregation) καθώς ορίζονται τα μονοπάτια δρομολόγησης που αυξάνουν την ζωή του δικτύου στο μέγιστο. Σε αυτήν την περίπτωση αν θεωρηθεί ένας προγραμματισμός «S» για «T» γύρους, περιλαμβάνεται μια ροή δικτύου «G». Η ροή «G» που δίνει την μέγιστη ζωή στο δίκτυο, υπολογιζόμενης και των ενεργειακών περιορισμών των αισθητήριων κόμβων ορίζεται ως η καταλληλότερη αποδεκτή ροή. Κατόπιν πάνω σε αυτήν την ροή κατασκευάζεται ένας προγραμματισμός «S».

Μια παραλλαγή του προβλήματος περιλαμβάνει τον αλγόριθμο «Δρομολόγηση δεδομένων για μέγιστη ζωή» (Maximum Lifetime Data Routing MLDR), και χρησιμοποιείται για δίκτυα όπου δεν είναι δυνατός ο συγκερασμός των δεδομένων π.χ. ροές δεδομένων από αισθητήρες βίντεο.

Και οι δύο αλγόριθμοι συγκρινόμενοι με το ιεραρχικό PEGASIS όσον αφορά στην μεγιστοποίηση της ζωής του δικτύου, απέδωσαν καλύτερα. Στην περίπτωση του MLDA έχουμε μια καθυστέρηση στην παράδοση των πακέτων από ότι το ιεραρχικό PEGASIS. Επίσης, αν και το MLDA αποδίδει καλά οι υπολογισμοί για την καλύτερη διαδρομή είναι δύσκολοι για μεγάλα δίκτυα, γι' αυτό και προτείνεται μια λύση που είναι η ομαδοποίηση (clustering) (CMLDA αλγόριθμος) ώστε να εξασφαλιστεί η δυνατότητα επέκτασης του αλγορίθμου σε μεγάλα δίκτυα.

3.5.4 Minimum Cost Forwarding

Το πρωτόκολλο αυτό [34] στοχεύει στο να βρει τη διαδρομή με το ελάχιστο δυνατό κόστος σε ένα μεγάλο δίκτυο αισθητήρων. Δεν είναι ακριβώς βασισμένο στην ροή του δικτύου, αλλά επειδή τα δεδομένα ρέουν στο μονοπάτι με το μικρότερο κόστος και οι πόροι των αισθητήριων κόμβων ανανεώνονται σε κάθε ροή, μπορεί να θεωρηθεί ότι ανήκει σε αυτήν την ομάδα.

Η συνάρτηση κόστους του πρωτοκόλλου υπολογίζει το φαινόμενο της καθυστέρησης, την διαμεταγωγή και την κατανάλωση της ενέργειας από κάθε κόμβο προς τον κόμβο δεξαμενή (sink). Το πρωτόκολλο λειτουργεί σε δύο φάσεις. Η πρώτη φάση είναι η φάση της εγκατάστασης, όπου και τίθεται το κόστος για κάθε κόμβο. Ένα μήνυμα ξεκινάει από τον κόμβο δεξαμενή (sink) και διαχέεται σε όλο το δίκτυο. Ο κάθε κόμβος διαμορφώνει το κόστος του προσθέτοντας το κόστος του κόμβου από τον οποίο έλαβε το μήνυμα και το κόστος της ζεύξης. Προκειμένου να περιοριστεί ο αριθμός των μηνυμάτων που διαχέονται, χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος οπισθοχώρησης (back-off based algorithm). Η προώθηση του μηνύματος παρατείνεται σε μια εξαρχής ορισμένη διάρκεια, προκειμένου να επιτρέψει

στα μηνύματα με το μικρότερο κόστος να φθάσουν σε κάθε κόμβο. Έτσι, ο αλγόριθμός λειτουργεί με ένα μόνο μήνυμα ανά κόμβο.

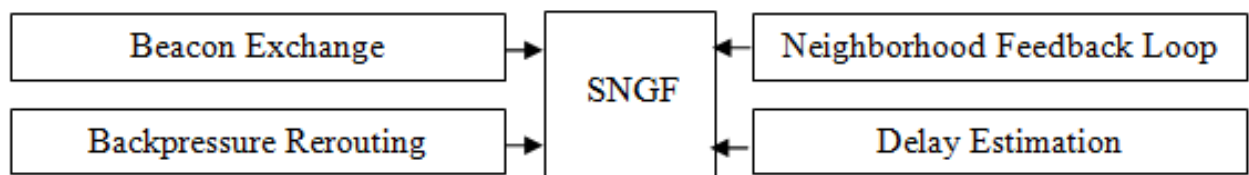
Στην επόμενη φάση του αλγορίθμου, η πηγή μεταδίδει ταυτόχρονα προς όλους τους γείτονές της δεδομένα. Οι κόμβοι που λαμβάνουν προσθέτουν το κόστος εκπομπής τους (αυτό που βρέθηκε από την πρώτη φάση) στο κόστος του πακέτου. Έπειτα, ο κόμβος ελέγχει το υπόλοιπο κόστος του πακέτου. Αν το κόστος αυτό δεν είναι αρκετό προκειμένου να φθάσει στον κόμβο δεξαμενή (sink), το πακέτο απορρίπτεται. Διαφορετικά αναμεταδίδεται προς τους γείτονές του όπως προηγουμένως κοκ. Αποτελέσματα προσομοίωσης έδειξαν ότι ο αλγόριθμος συμπεριφέρεται όπως και η «πλημμύρα» (flooding). Με τον αλγόριθμο οπισθοχώρησης τα εκπεμπόμενα μηνύματα κατά την πρώτη φάση μειώνονται στο μισό σε σχέση με το flooding.

3.5.4 Sequential Assignment Routing SAR

Είναι το πρώτο πρωτόκολλο [35] για δίκτυα αισθητήρων το οποίο περιλαμβάνει την έννοια της ποιότητας υπηρεσίας (QoS), στις αποφάσεις της δρομολόγησης. Το πρωτόκολλο αυτό δημιουργεί πολλά δέντρα των οποίων η ρίζες είναι οι άμεσοι γείτονες προς τον κόμβο δεξαμενή (sink). Το κάθε δέντρο επεκτείνεται μακριά από τον κόμβο δεξαμενή (sink), αποφεύγοντας να συμπεριλάβει σε αυτό κόμβους με πολύ χαμηλή ποιότητα υπηρεσίας (QoS) ή μικρή εναπομένουσα ενέργεια. Στο τέλος αυτής της διαδικασίας οι περισσότεροι κόμβοι ανήκουν σε πολλαπλά δέντρα. Αυτό επιτρέπει στον κόμβο να επιλέγει το καταλληλότερο δέντρο προκειμένου να αναμεταδώσει προς τον κόμβο δεξαμενή (sink). Σε κάθε μονοπάτι υπάρχουν δύο παράμετροι, που χρησιμοποιούν οι κόμβοι προκειμένου να επιλέξουν το καταλληλότερο μονοπάτι. α) *Η εναπομένουσα ενέργεια*, που υπολογίζεται από τον αριθμό των πακέτων που μπορεί να στείλει ένας κόμβος σε μια διαδρομή αν έχει αποκλειστική χρήση και β) *η ποιότητα της υπηρεσίας (QoS)*. Οι κόμβοι επιλέγουν το καταλληλότερη διαδρομή βασιζόμενοι στις δύο παραπάνω παραμέτρους καθώς και στον βαθμό προτεραιότητας του πακέτου. Αποτελέσματα προσομοίωσης έδειξαν ότι το SAR προσφέρει μικρότερη κατανάλωση ενέργειας από ότι ο αλγόριθμος της ελάχιστης εκπεμπόμενης ενέργειας (Minimum Transmitted Energy MTE). Το πρωτόκολλο SAR τηρεί ταυτόχρονα πολλαπλά μονοπάτια από τους κόμβους προς τον κόμβο δεξαμενή (sink). Αν και έτσι έχουμε αντοχή σε λάθη και εύκολη επαναφορά μετά από δυσλειτουργία κάποιου κόμβου, έχουμε δυσκολία στην διατήρηση των πινάκων δρομολόγησης σε κάθε κόμβο, ειδικά όταν το δίκτυο είναι μεγάλο.

3.5.6 Speed

Το πρωτόκολλο αυτό [36] απαιτεί από τον κάθε κόμβο να διατηρεί πληροφορία για τους γείτονές του και χρησιμοποιεί γεωγραφική προώθηση των πακέτων για να βρει τα μονοπάτια. Επιπλέον, το πρωτόκολλο αυτό προσπαθεί να επιτύχει μια σταθερή ταχύτητα για κάθε πακέτο που κινείται στο δίκτυο, έτσι ώστε η κάθε εφαρμογή να μπορεί να εκτιμήσει την από άκρη σε άκρη καθυστέρηση. Επίσης, το πρωτόκολλο μπορεί να αποφύγει την συμφόρηση όταν συμβαίνει αυτό στο δίκτυο. Το συστατικό (module) δρομολόγησης του πρωτοκόλλου ονομάζεται Stateless Non-Deterministic forwarding (SNFG), και συνεργάζεται με τέσσερα άλλα συστατικά στο επίπεδο του δικτύου. Αυτό φαίνεται στην **Εικόνα 21**.



Εικόνα 21: Συστατικά δρομολόγησης του SPEED [He et al., 36].

Ο μηχανισμός ανταλλαγής σηματοδοσίας (beacon exchange) συλλέγει πληροφορίες για τους κόμβους και για την θέση τους. Ο υπολογισμός της καθυστέρησης (delay estimation) σε κάθε κόμβο γίνεται υπολογίζοντας τον χρόνο που πέρασε μέχρι να ληφθεί μια θετική αναγνώριση (ACK) από τον γειτονικό κόμβο σαν απάντηση σε ένα μεταδιδόμενο πακέτο. Εξετάζοντας τις τιμές της καθυστέρησης το SNFG επιλέγει τον κόμβο, που ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της ταχύτητας που έχουν τεθεί. Αν δεν μπορεί να βρεθεί τέτοιος κόμβος, τότε εξετάζεται ο λόγος αναμετάδοσης του κόμβου. Το συστατικό Neighborhood Feedback Loop είναι υπεύθυνο για να παρέχει την τιμή του λόγου αναμετάδοσης, ο οποίος υπολογίζεται ελέγχοντας τους κόμβους που δεν μπορούν να παρέχουν την επιθυμητή ταχύτητα στα πακέτα κατά την αναμετάδοση. Αν η τιμή αυτού του λόγου είναι μικρότερη από μια τυχαία παραγόμενη τιμή μεταξύ του 0 και του 1, το πακέτο απορρίπτεται. Τέλος, το τελευταίο συστατικό του σχήματος είναι το backpressure-rerouting module, που χρησιμοποιείται για να αποτρέψει κενά, όταν ένας κόμβος αποτύχει να βρει τον γειτονικό κόμβο και επίσης για να εξαφανίσει την συμφόρηση στέλνοντας μηνύματα πίσω στους κόμβους που απέστειλαν τα πακέτα, προκειμένου να αναζητήσουν νέες διαδρομές.

Συγκρίνοντάς το με το Dynamic Source Routing (DSR) και το Ad-hoc on-demand vector routing (AODV), το SPEED λειτουργεί καλύτερα όσον αφορά στην καθυστέρηση από άκρη σε άκρη. Επιπλέον, η ολική εκπεμπόμενη ενέργεια είναι λιγότερη λόγω της απλότητας του αλγορίθμου, δηλαδή το κόστος ελέγχου του πακέτου είναι μικρότερο και στην ισόρροπη διανομή της κίνησης. Τέτοιο καταμερισμός του φορτίου επιτυγχάνεται χάρη στο μηχανισμό

SNFG. Ανάλογος καταμερισμός της κίνησης εκτελείται και στο GBR, με την κατανομή της κίνησης ομοιόμορφα μέσα στο δίκτυο.

3.6 Σύνοψη των πρωτοκόλλων δρομολόγησης

Προκειμένου να υπάρχει μια πιο ολοκληρωμένη άποψη για τα πρωτόκολλα δρομολόγησης, ακολουθεί ο συγκριτικός **Πίνακας 3** στον οποίο φαίνεται σε ποια κατηγορία ανήκει το κάθε ένα. Είναι δυνατόν μερικά πρωτόκολλα να ανήκουν σε περισσότερες από μία ομάδες, γιατί συγκεντρώνουν χαρακτηριστικά από δύο ή περισσότερες ομάδες. Η κύρια ομάδα στην οποία ανήκει ένα πρωτόκολλο σημειώνεται με + , ενώ οι επιπλέον ομάδες με ✓. Επιπλέον, υπάρχει μία ακόμα κατηγορία όπου φαίνεται εάν το πρωτόκολλο κατά την δρομολόγηση κάνει συνάθροιση δεδομένων ή όχι σε κάποιους κόμβους. Η συνάθροιση είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την εξοικονόμηση ενέργειας, αφού επιτυγχάνεται η αποστολή λιγότερων μηνυμάτων. Η τοπική επεξεργασία στους κόμβους καταναλώνει ελάχιστη ενέργεια σε σχέση με την εκπομπή ενός μηνύματος.

Πίνακας 3: Σύγκριση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης για δίκτυα αισθητήρων.

Πρωτόκολλο Δρομολόγησης	Δεδομένο-Κεντρικά	Ιεραρχικά	Βασισμένα στη θέση	Ποιότητα Υπηρεσίας και Ροή Δικτύου	Συγκερασμός Δεδομένων
Energy Aware Routing for cluster based WSN		+	✓		
Self Organizing Protocol		+			✓
MECN&SMECN			+		
GAF		+	+		
GEAR			+		
Maximum Lifetime Energy Routing		+		+	
Maximum Lifetime Data Gathering			+	+	
Minimum Cost Forwarding		✓		+	
SAR				+	
Energy-Aware QoS Routing			✓	+	
SPEED			✓	+	
Flooding & Gossiping	+				
SPIN	+				✓
Directed Diffusion	+				✓
Rumor Routing	+				✓
Energy Aware Routing	+		✓		
GBR	+				✓
CADR	+				
COUGAR	+				✓
ACQUIRE	+				
LEACH		+			✓
TEEN&APTEEN	✓	+			✓
PEGASIS		+			✓

Υπόμνημα: + κύριο χαρακτηριστικό ✓ δευτερεύων χαρακτηριστικό

Κεφάλαιο 4ο – Μελέτη Πρωτοκόλλου

4.1 Προτεινόμενο Μοντέλο Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων

Στο μοντέλο που προτείνουμε εδώ, κάθε κόμβος του δικτύου είναι μία ολοκληρωμένη, αυτόνομη υπολογιστική συσκευή με δυνατότητες ασύρματης επικοινωνίας και καταγραφής περιβαλλοντικών συνθηκών. Διαθέτει επεξεργαστή με περιορισμένη υπολογιστική ισχύ και μικρής χωρητικότητας μνήμη. Διαθέτει ένα κύκλωμα ασύρματης επικοινωνίας το οποίο είναι συνήθως μονοκάναλο, αν και η συχνότητα που χρησιμοποιεί μπορεί να μεταβληθεί και η εμβέλεια κυμαίνεται από μερικά μέτρα μέχρι μερικές εκατοντάδες μέτρα. Η αυτονομία εξασφαλίζεται αφού κάθε συσκευή τροφοδοτείται από μία ενσωματωμένη πηγή ενέργειας. Επιπλέον, κάθε αισθητήρας διαθέτει εξειδικευμένα κυκλώματα για την καταγραφή διάφορων μεγεθών, όπως των περιβαλλοντικών συνθηκών (πχ. θερμοκρασία, φωτεινότητα, ένταση μαγνητικού πεδίου), ανίχνευση γεγονότων (πχ κίνηση, παρουσία χημικών ενώσεων) ακόμα και επιτήρησης του χώρου (λήψη εικόνων και καταγραφή θορύβων). Οι συσκευές αισθητήρων μπορούν να επικοινωνήσουν ασύρματα μεταξύ τους σε απόσταση που εξαρτάται από το κύκλωμα και την κεραία του πομποδέκτη τους, το μοντέλο εξασθένισης του σήματος και την ενέργειά τους. Θεωρούμε ότι η απόσταση επικοινωνίας είναι ίδια σε όλες τις συσκευές και παίρνει μία προκαθορισμένη τιμή R .

Το προτεινόμενο μοντέλο δικτύου αισθητήρων χρησιμοποιεί ιεραρχική δομή με clusters πολλαπλών επιπέδων. Επιλέξαμε ιεραρχική δρομολόγηση, γιατί πρόκειται για έναν αποδοτικό τρόπο για την επίτευξη χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας μέσα σε ένα cluster, υλοποιώντας από την πλευρά των cluster heads συνάθροιση δεδομένων και μειώνοντας έτσι το συνολικό αριθμό των μηνυμάτων που στέλνονται στον σταθμό βάσης. Η δημιουργία clusters πολλαπλών επιπέδων και η ανάθεση συγκεκριμένων καθηκόντων στους cluster heads συμβάλλει γενικά στην επεκτασιμότητα του συστήματος και στην αύξηση της διάρκειας ζωής του. [7,48]

Οι τύποι κόμβων στο σύστημά μας και ο ρόλος του κάθε ένα είναι ο ακόλουθος:

- Έναν σταθμό βάσης, ο οποίος συλλέγει τις πληροφορίες που έρχονται από όλους τους κόμβους αισθητήρων του δικτύου και αποτελεί την πύλη μέσω της οποίας ο χρήστης έχει πρόσβαση στα δεδομένα του δικτύου. Ο σταθμός βάσης δεν παρουσιάζει κανέναν περιορισμό ως προς την ενέργεια που μπορεί να καταναλώσει και μπορεί να εκπέμπει με τέτοια ισχύ, έτσι ώστε να μπορεί επικοινωνήσει και με τον πιο απομακρυσμένο κόμβο του δικτύου.
- Κόμβους αισθητήρων, οι οποίοι έχουν περιορισμούς ως προς την ενέργεια που μπορούν να καταναλώσουν. Θεωρούμε ότι όλοι οι κόμβοι του δικτύου είναι ομογενείς

και έχουν αρχικά την ίδια ενέργεια. Κάθε κόμβος ανήκει σε ένα cluster, όπου υπάρχει κάποιος cluster head επιπέδου 1. Αυτός συγκεντρώνει τα δεδομένα και τα στέλνει στον cluster head επιπέδου 2. Καθήκον του cluster head επιπέδου 2 είναι να συγκεντρώνει τα δεδομένα από τους cluster heads επιπέδου 1 ή και από τους κόμβους του δικού του cluster και να τα προωθεί σε άλλους cluster heads επιπέδου 2 (θεωρούμε ότι μεγαλύτερου επιπέδου cluster heads στο προτεινόμενο μοντέλο δεν υπάρχουν) ή στον σταθμό βάσης. Το μοντέλο αυτό απεικονίζεται στην **Εικόνα 13**.

Τα βασικά χαρακτηριστικά της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής είναι:

- Οι κόμβοι αισθητήρων είναι τοποθετημένοι σε ένα $M \times N$ λογικό πλέγμα. Κάθε κόμβος ονοματοδοτείται από ένα ζευγάρι (i,j) , όπου $i=0,\dots,M-1$ και $j=0,\dots,N-1$, ενώ ο κόμβος στη θέση $(M-1,N-1)$ είναι ο σταθμός βάσης. Χρησιμοποιώντας ένα λογικό πλέγμα το πρωτόκολλο δεν χρειάζεται για τον κάθε κόμβο να γνωρίζει την ακριβή του θέση, όπως συμβαίνει με άλλα πρωτόκολλα δρομολόγησης που βασίζονται στη γνώση θέσης, αρκεί αυτό το μοναδικό αναγνωριστικό θέσης. Οι συντεταγμένες του κάθε κόμβου στο λογικό πλέγμα και κατ' επέκταση οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων αντιπροσωπεύουν και τη φυσική τοπολογία του δικτύου.
- Η τοπολογία είναι στατική, οπότε και το αναγνωριστικό θέσης του κάθε κόμβου αισθητήρα είναι σταθερό και υπολογίζεται μία και μόνο φορά.
- Θεωρούμε ότι οι cluster heads κάθε cluster γνωρίζουν τους γείτονές τους με τους οποίους μπορούν να επικοινωνούν. Γείτονας ενός cluster head μπορεί να θεωρηθεί ένας άλλος cluster head ο οποίος είναι στο ίδιο ή σε μεγαλύτερο επίπεδο.
- Κάθε κόμβος στέλνει τα ενεργειακά του αποθέματα στους γείτονες του ανά T sec.
- Θεωρούμε ότι στο δίκτυο ο κάθε κόμβος είναι ενημερωμένος για τα ενεργειακά αποθέματα των γειτόνων του.
- Θεωρούμε ότι αριθμός των πακέτων δεδομένων που μεταδίδει ο κάθε κόμβος είναι σταθερός. Η παραδοχή αυτή γίνεται για την ευκολία της ανάλυσης.
- Τουλάχιστον 1 φορά όλοι οι κόμβοι στέλνουν προς τους γείτονές τους τα ενεργειακά τους αποθέματα. Κατόπιν:

Κάθε κόμβος διατηρεί δύο μετρητές. Ο πρώτος μετρητής αφορά τα εισερχόμενα μηνύματα και ο δεύτερος τα εξερχόμενα. Ο κόμβος στέλνει περιοδικά τα ενεργειακά του αποθέματα μόνο όταν έχει μεταβληθεί τουλάχιστον ένας μετρητής. Δηλαδή αν k_in ο μετρητής για τα εισερχόμενα και k_out για τα εξερχόμενα, τότε θα στείλει πακέτο ενημέρωσης για τα ενεργειακά του αποθέματα ο συγκεκριμένος κόμβος εάν ισχύει: $f(c(k_in) \parallel c(k_out))$ όπου $c(k_in)$, $c(k_out)$ Boolean συναρτήσεις που έχουν τιμή T ή F ανάλογα με το εάν έχουν μεταβληθεί οι μετρητές.

4.2 Προτεινόμενο Πρωτόκολλο

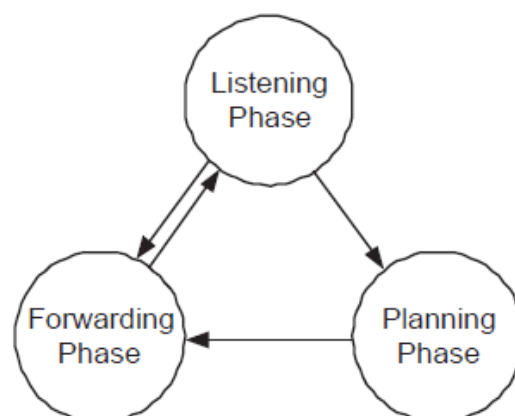
Ο κύριος στόχος του πρωτοκόλλου μας είναι η αύξηση της διάρκειας ζωής όλου του δικτύου. Επειδή, θα χρησιμοποιηθεί η ιεραρχική δρομολόγηση πολλαπλών επιπέδων για τον σχεδιασμό του δικτύου, αυτό κυρίως που μας ενδιαφέρει είναι να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας στους cluster heads του τελευταίου επιπέδου, γιατί αυτοί συγκεντρώνουν και την μεγαλύτερη κίνηση στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, οι cluster heads θα στέλνουν τα δεδομένα σε γειτονικούς cluster heads του ίδιου επιπέδου αντί να τα στέλνουν απευθείας στον σταθμό βάσης, όπως συμβαίνει στην απλή περίπτωση δρομολόγησης. Το κριτήριο με το οποίο θα επιλεγεί ο γειτονικός cluster head είναι η ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται για την αποστολή των πακέτων δεδομένων. Η ενέργεια που καταναλώνεται σε κάθε μετάδοση δεδομένων εξαρτάται και από τον όγκο των δεδομένων, αλλά και από την απόσταση στην οποία βρίσκεται ο κόμβος - παραλήπτης. Με αυτό τον τρόπο τα ποσά ενέργειας που θα καταναλώνονται θα είναι πολύ μικρότερα σε σχέση με την απευθείας μετάδοση στο σταθμό βάσης, γιατί τα δεδομένα θα στέλνονται σε μικρότερες αποστάσεις.

Η μετάδοση των δεδομένων προς τον σταθμό βάσης γίνεται σε τρεις διακριτές φάσεις, οι οποίες απεικονίζονται και στην **Εικόνα 22**:

1. Φάση αναμονής (Listening Phase): Ο αισθητήρας εκτελεί μια εφαρμογή καταγραφής δεδομένων, δημιουργεί μηνύματα προκειμένου να αναφέρει τις καταγεγραμμένες τιμές.

2. Φάση σχεδίασης μονοπατιού (Planning Phase): Το πρωτόκολλο προσπαθεί να υπολογίσει ένα μονοπάτι, βελτιστοποιημένο με βάση την πληροφορία που έχει συλλέξει προκειμένου να μεταδώσει δεδομένα.

3. Φάση μετάδοσης δεδομένων (Forwarding Phase): Το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί το μονοπάτι που υπολόγισε για να μεταδώσει τα δεδομένα.



Εικόνα 22: Φάσεις Πρωτοκόλλου.

4.2.1 Αρχικοποίηση Πρωτοκόλλου

Υποθέτουμε ότι κατά την ανάπτυξη του δικτύου πριν αρχίσει η εκτέλεση του πρωτοκόλλου μας εκτελείται μια φάση αρχικοποίησης. Σε αυτή τη φάση ο κάθε κόμβος αισθητήρα γνωρίζει την θέση του μέσα στο πλέγμα. Φυσικά αυτό γίνεται με την ύπαρξη εξειδικευμένου υλικού, όπως είναι το GPS, το οποίο ο κάθε κόμβος χρησιμοποιεί για να υπολογίσει το δικό του αναγνωριστικό θέσης. Ένα τέτοιο πρωτόκολλο (LGR Protocol), το οποίο αναθέτει *εικονικές συντεταγμένες* σε όλες τις συσκευές αισθητήρων που απαρτίζουν το δίκτυο, προτείνεται στο [11] και είναι συμβατό με το μοντέλο μας. Αφού είχαμε υποθέσει ότι στο μοντέλο μας οι συσκευές παραμένουν ακίνητες αυτή η φάση χρειάζεται να εκτελεστεί μία μόνο φορά και έπειτα δεν επιβαρύνει τη λειτουργία του δικτύου.

Με τη χρήση του πρωτοκόλλου ο κόμβος αισθητήρα αποκτά ένα μέσο υπολογισμού των αποστάσεων με τους υπόλοιπους κόμβους και τον σταθμό βάσης. Έστω $d(i,j)$ η Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ των κόμβων αισθητήρων i και j , όπως υπολογίζεται από τους κόμβους με την χρήση των πληροφοριών που αποκτήθηκαν από το πρωτόκολλο.

Σε αυτή τη φάση ο κάθε κόμβος έχει γνώση της τοπικής του κατάστασης, δηλαδή της διαθέσιμης ενέργειας του και του φόρτου της συσκευής του. Έπειτα, ο κάθε κόμβος θα πρέπει ανά T sec και αν ισχύει $f(c(k_in) \parallel c(k_out))$ να στέλνει στους γείτονές του ένα πακέτο ενημέρωσης σχετικά με το ενεργειακό του απόθεμα. Η γνώση της διαθέσιμης ενέργειας των γειτονικών κόμβων είναι ένας καθοριστικός παράγοντας για την επιλογή του επόμενου κόμβου προς μετάδοση.

Συγκεκριμένα για τον κάθε κόμβο αισθητήρα ισχύει ο παρακάτω ψευδοκώδικας:

```
sensor(i,j) (where  $i \neq M-1$  &&  $j \neq N-1$ ); //αποστολέας
sensor(M-1,N-1); //σταθμός βάσης
E(i,j); //ενέργεια του αποστολέα

Const
T: integer; //χρόνος που μεσολαβεί για τον έλεγχο αποστολής ενός μηνύματος ενέργειας
P: set of clusterheads; // γείτονες του αποστολέα
packets : integer;
gatepid=sensor(M-1,N-1); //αναγνωριστικό σταθμού βάσης
E_pack; // η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για την αποστολή ενός πακέτου μεγέθους L

Var
x:0,...,M-1;
y:0,...,N-1;
pid:element from P; //αναγνωριστικό γείτονα
myid=sensor(i,j); //αναγνωριστικό αποστολέα
d; //Ευκλείδεια απόσταση
s; //min των Ευκλείδειων αποστάσεων
l; // δείκτης ενεργειακής απώλειας
E(x,y); //ενέργεια του sensor(x,y)
Eout; //ενέργεια που απαιτείται για την αποστολή δεδομένων
```

```

Ein; //ενέργεια που απαιτείται για την παραλαβή δεδομένων
Emax; // max των ενεργειών των γειτόνων
kin (x,y)=0; //μετρητής εισερχόμενων μηνυμάτων
kout (x,y)=0; //μετρητής εξερχόμενων μηνυμάτων
pids[ ]={ }; //προσωρινή μνήμη για αναγνωριστικά αποστολέων

Begin
// ο κόμβος στέλνει στους γείτονες του ανά T sec και εφόσον έχουν μεταβληθεί οι μετρητές kin και
kout το ενεργειακό του απόθεμα
  ∀ sensor(x,y) in P: {
    if (timeout(T) && f(c(kin) || c(kout))) )
      send (sensor(x,y), <Energy, E(i,j)>);
  }

//υπολογισμός Ευκλείδειας απόστασης μεταξύ αποστολέα και σταθμού βάσης
d(myid,gatepid)=((M-1-i)^2+(N-1-j)^2)^(1/2);
  ∀ sensor(x,y) in P: {
    pid=sensor(x,y);
    d(myid,pid)=((x-i)^2+(y-j)^2)^(1/2)]; //υπολογισμός Ευκλείδειων αποστάσεων
  }                                     //μεταξύ αποστολέα και γειτονικών
                                     // κόμβων

//βρίσκω την μικρότερη Ευκλείδεια απόσταση
s=min(d(myid,pidi), d(myid,gatepid)), i ∈ P;

```

Θεωρούμε ότι για την περίπτωση μετάδοσης ενός πακέτου δεδομένων ο κόμβος αισθητήρα καταναλώνει ένα ποσό ενέργειας E_{out} για την λειτουργία του, ενώ για την λήψη ενός πακέτου δεδομένων καταναλώνει ένα ποσό ενέργειας E_{in}. Θεωρούμε επίσης ότι στην κατάσταση αδράνειας, όταν δηλαδή ο κόμβος αισθητήρα περιμένει για την αποστολή ή τη λήψη δεδομένων καταναλώνει ένα ποσό ενέργειας E_{idle} το οποίο όμως θεωρούμε αμελητέο. Η παραδοχή αυτή γίνεται για την ευκολία της ανάλυσης.

Αφού υπολογιστούν όλες οι Ευκλείδειες αποστάσεις μεταξύ του κόμβου - αποστολέα και των γειτονικών του κόμβων και με τον σταθμό βάσης βρίσκουμε την ελάχιστη απόσταση s. Αυτή η τιμή θα χρησιμοποιηθεί αργότερα στον υπολογισμό της ενέργειας που καταναλώνεται όταν κάποιος κόμβος μεταδίδει δεδομένα κατά τη φάση σχεδιασμού μονοπατιού.

4.2.2 Η φάση αναμονής

Στη φάση αναμονής οι κόμβοι αισθητήρων παρακολουθούν το περιβάλλον καταγράφοντας δεδομένα ανάλογα με την εργασία καταγραφής που εκτελούν. Η μόνη μορφή επικοινωνίας που υφίσταται στο δίκτυο είναι η αποστολή μηνυμάτων ενέργειας ανά T_{sec} από τους κόμβους των οποίων κάποιος από τους δύο μετρητές k_{in} , k_{out} έχει μεταβληθεί. Έπειτα, παραμένουν αδρανείς εφόσον δεν χρειάζεται να στείλουν δεδομένα και περιμένουν τη λήψη μηνυμάτων από τους γειτονικούς κόμβους. Οι αισθητήρες παραμένουν στη φάση αναμονής μέχρι:

- να καταγράψουν πληροφορία για ένα νέο γεγονός που αφορά την εργασία καταγραφής, οπότε και πρέπει να την προωθήσουν στον σταθμό βάσης ή
- να λάβουν δεδομένα από κάποιον άλλο κόμβο στην περίπτωση που αυτοί οι αισθητήρες είναι cluster heads. Οι απλοί κόμβοι δεν λαμβάνουν πάρα μόνο στέλνουν. Η μόνη περίπτωση που λαμβάνουν οι απλοί κόμβοι είναι όταν τους στέλνει κάτι ο cluster head τους.

4.2.3 Η φάση σχεδίασης μονοπατιού

Ένας αισθητήρας περνά στη φάση σχεδιασμού μονοπατιού όταν πρέπει να προωθήσει δεδομένα. Θα πρέπει να επιλέξει με κάποιο κριτήριο τον επόμενο κόμβο στον οποίο θα μεταδώσει τα δεδομένα. Το κριτήριο αυτό είναι η κάθε μετάδοση να γίνεται με την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση ενέργειας.

Αρχικά, θα υπολογιστεί ένα ποσοστό ενεργειακής απώλειας για τον κόμβο - αποστολέα σε σχέση με όλους τους πιθανούς παραλήπτες που είναι το σύνολο των γειτονικών κόμβων και ο σταθμός βάσης. Ο δείκτης I είναι ανάλογος της Ευκλείδειας απόστασης μεταξύ του κόμβου - αποστολέα και του κόμβου - παραλήπτη και αντιστρόφως ανάλογος της ελάχιστης Ευκλείδειας απόστασης που βρήκαμε στην προηγούμενη φάση.

Στην πρώτη μετάδοση που πρόκειται να κάνει ο κόμβος θα επιλέξει να στείλει τα δεδομένα στον κόμβο με το μικρότερο I . Στην περίπτωση που δύο ή παραπάνω κόμβοι έχουν το ίδιο I επιλέγεται τυχαία κάποιος από αυτούς τους κόμβους για μετάδοση. Στις επόμενες μεταδόσεις κριτήριο για την επιλογή του κόμβου – παραλήπτη είναι η διαθέσιμη ενέργεια του κάθε γειτονικού κόμβου. Ο κόμβος – αποστολέας θα επιλέξει να στείλει δεδομένα στον γειτονικό κόμβο με τα μεγαλύτερα ενεργειακά αποθέματα. Στην περίπτωση που υπάρχουν περισσότεροι του ενός γειτονικοί κόμβοι με την ίδια μέγιστη διαθέσιμη ενέργεια ο κόμβος – αποστολέας θα επιλέξει να στείλει στον κόμβο με το μικρότερο I , έτσι

ώστε η μετάδοση να γίνει με την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. Η αλλαγή του κριτηρίου επιλογής του κόμβου – παραλήπτη από την δεύτερη μετάδοση και για όλες τις επόμενες μεταδόσεις του κόμβου – αποστολέα γίνεται για να μην επιλέγεται πάντα ο ίδιος κόμβος σαν παραλήπτης δεδομένων. Κάτι τέτοιο θα οδηγούσε πάρα πολύ γρήγορα το δίκτυο σε διαμερισμό, καθώς ο κόμβος – αποστολέας θα έστελνε όλη την κίνηση του στον ίδιο γειτονικό κόμβο γεγονός που θα εξαντλούσε γρήγορα τα ενεργειακά του αποθέματα.

Θα πρέπει να επισημανθεί, όμως, μια εξαίρεση που αφορά τον πιο κοντινό στον σταθμό βάσης cluster head επιπέδου 2. Αυτός θα πρέπει να στέλνει κατευθείαν στον σταθμό βάσης, γιατί διαφορετικά κανένα από τα δεδομένα δεν θα δρομολογούνταν στον σταθμό βάσης. Η τοπολογία, όπως είπαμε είναι στατική, ο κάθε cluster head γνωρίζει τη θέση του μέσα στο πλέγμα, οπότε ξέρει και ποιος είναι ο πιο κοντινός κόμβος στον σταθμό βάσης. Όταν ο πιο κοντινός κόμβος πεθάνει την απευθείας δρομολόγηση αναλαμβάνει ο αμέσως πιο κοντινός στον σταθμό βάσης. Οι υπόλοιποι κόμβοι καταλαβαίνουν ότι ο πιο κοντινός κόμβος έχει πεθάνει αφού δεν θα έχουν λάβει για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα κάποιο μήνυμα ενέργειας από αυτόν, οπότε αναλαμβάνει ο επόμενος την δρομολόγηση. Αυτός θεωρητικά θα πρέπει ανά T sec να στέλνει μηνύματα ενέργειας αφού το $f(c(k_{in}) || c(k_{out}))$ μεταβάλλεται αρκετά συχνά, καθώς είναι ο κόμβος με την μεγαλύτερη κίνηση στο δίκτυο.

Επίσης, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας και την περίπτωση που η ενέργεια κανενός από τους γειτονικούς κόμβους δεν επαρκεί για την μετάδοση των δεδομένων. Σε αυτή την περίπτωση ο κόμβος – αποστολέας μπορεί να στείλει τα δεδομένα κατευθείαν στον σταθμό βάσης.

Ολοκληρώνοντας τη φάση σχεδιασμού μονοπατιού θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη η πιθανή εμφάνιση κύκλου επανάληψης (loop) κατά τη δρομολόγηση των δεδομένων. Για να αποφευχθεί ένα τέτοιο πρόβλημα θα πρέπει οι cluster heads να μην προωθούν τα δεδομένα στους κόμβους από τους οποίους τα έλαβαν. Κάτι τέτοιο θα υλοποιηθεί με μια προσωρινή αποθήκη μνήμης αναγνωριστικών που θα έχει ο κάθε cluster head με τα αναγνωριστικά των αποστολέων των δεδομένων και η οποία θα μηδενίζεται μετά την αποστολή των δεδομένων.

Συγκεκριμένα για τον κόμβο - αποστολέα ισχύει ο παρακάτω ψευδοκώδικας:

//υπολογισμός του l και για τον σταθμό βάσης και για τους γειτονικούς κόμβους.

```
l(myid,gatepid)=d(myid,gatepid)/s;  
∀ sensor(x,y) in P: {  
    l(myid,pid)=d(myid,pid)/s;  
}
```

// ο πιο κοντινός κόμβος στον σταθμό βάσης στέλνει τα δεδομένα απευθείας στον σταθμό βάσης

```
if (d(myid, gatepid)=min(d(pidi,gatepid)), i ∈ P){  
    while (d(myid, gatepid)=min(d(pidi,gatepid)), i ∈ P &&  
        E(i,j)>=E_pack*sizeof(packets)*#packets){  
        send (gatepid, <Data>);  
    }  
else{
```

// 1^η μετάδοση: τα δεδομένα θα σταλθούν στον γειτονικό κόμβο με το μικρότερο l

//έλεγχος διαθέσιμης ενέργειας αποστολέα

```
while (E(i,j)>=E_pack*sizeof(packets)*#packets) {  
    //έλεγχος διαθέσιμης ενέργειας παραλήπτη  
    if (E sensor (x,y) in P: E(x,y)>= E_pack*sizeof(packets)*#packets) {  
        send (sensor(x,y) with the min l && pid !E pids[myid], <Data>, myid);  
    }  
}
```

//επόμενες μεταδόσεις: ο αποστολέας στέλνει τα δεδομένα στον γειτονικό κόμβο με τα μεγαλύτερα ενεργειακά αποθέματα

```
while (E sensor(x,y) in P: E(x,y)>= E_pack*sizeof(packets)*#packets) {  
    Emax=max( E(x,y)i ) , i ∈ P;  
    send (sensor(x,y) with Emax&& pid !E pids[myid], <Data>,myid);
```

//αν υπάρχουν κόμβοι που έχουν την ίδια ενέργεια επιλέγεται ο κόμβος με το μικρότερο l

```
if (E sensor(x',y') in P: E(x',y')==E(x,y) &&  
    pidi !E pids[myid]) {  
    if ( l(myid,pid)<=l(myid,pid') ) {  
        send (sensor(x,y), <Data>, myid);  
    }  
    else {  
        send (sensor(x',y'), <Data>, myid);  
    }  
}
```

```
pids[myid]={ }; //μετά την αποστολή των δεδομένων μηδενίζεται η προσωρινή  
αποθήκη μνήμης των αναγνωριστικών  
}
```

*//αν η ενέργεια κανενός από τους γειτονικούς κόμβους δεν επαρκεί για την μετάδοση των δεδομένων,
τότε στέλνονται κατευθείαν στον σταθμό βάσης*

```
send (gatepid, <Data>);  
}
```

4.2.4 Η φάση μετάδοσης δεδομένων

Στη φάση μετάδοσης ο κόμβος αισθητήρα μεταδίδει τα δεδομένα στον κόμβο - παραλήπτη. Απαραίτητη προϋπόθεση πάντοτε για την μετάδοση δεδομένων είναι η ενέργεια και του κόμβου - αποστολέα και του κόμβου - παραλήπτη να επαρκεί. Έπειτα, υπολογίζεται η ενέργεια που καταναλώνεται και από την πλευρά του κόμβου – αποστολέα και του κόμβου - παραλήπτη. Το ποσό ενέργειας που καταναλώθηκε είναι ανάλογο του l , της ελάχιστης ενέργειας που δαπανάται για την αποστολή ενός πακέτου, του μεγέθους του πακέτου και του αριθμού των πακέτων που στέλνονται σε κάθε αποστολή.

Συγκεκριμένα για τον κόμβο - αποστολέα ισχύει ο παρακάτω ψευδοκώδικας:

```
k_out(i,j)++; //αύξηση μετρητή εξερχόμενων μηνυμάτων
Eout=l(myid,pid)* E_pack*sizeof(packets)*#packets;
E(i,j)=E(i,j)-Eout; //ενέργεια που χάνει ο αποστολέας
```

Για τον κόμβο - παραλήπτη ισχύει ο παρακάτω ψευδοκώδικας:

```
k_in(x,y)++; //αύξηση μετρητή εισερχόμενων μηνυμάτων
Ein=l(myid,pid)* E_pack*sizeof(packets)*#packets;
E(x,y)=E(x,y)-Ein; //ενέργεια που χάνει ο παραλήπτης
pids[myid]=pids[myid]+{pid of sender};
```

4.3 Μετρικές απόδοσης

Σε αυτή την ενότητα αξιολογούμε την απόδοση του πρωτοκόλλου μας βασισμένοι στις τρεις ακόλουθες στοιχειώδεις μετρικές: το ποσοστό επιτυχούς παράδοσης, τον χρόνο που ο πρώτος cluster head πεθαίνει και τον μέσο όρο διάρκειας ζωής του δικτύου. Αυτές οι μετρικές καθορίζουν την ικανότητα του πρωτοκόλλου να συντονίσει τους κόμβους αισθητήρων, ώστε όλα τα δεδομένα να μεταφέρονται στον σταθμό βάσης με ενεργειακά αποδοτικό τρόπο και με όσο τον δυνατόν μικρότερη καθυστέρηση.

Έστω K ο συνολικός αριθμός γεγονότων που καταγράφονται από τους κόμβους αισθητήρων, που για το καθένα δημιουργείται ένα μήνυμα που πρέπει να προωθηθεί στον σταθμό βάσης. Ας υποθέσουμε ότι το πρωτόκολλο καταφέρνει να παραδώσει k από αυτά τα μηνύματα.

Ορισμός 1 (Ποσοστό επιτυχούς παράδοσης) P , είναι το ποσοστό του αριθμού γεγονότων που αναφέρθηκαν επιτυχώς στον σταθμό βάσης ως προς το συνολικό αριθμό μηνυμάτων, δηλαδή $P=k/K$.

Ορισμός 2 (Χρόνος που ο πρώτος cluster head πεθαίνει) *Time First Cluster Head Die*, είναι η χρονική στιγμή που ο πρώτος cluster head του τελευταίου επιπέδου πεθαίνει. Με αυτό τον τρόπο δείχνουμε ότι παρατείνεται η διάρκεια ζωής των cluster heads του τελευταίου επιπέδου και άρα και του δικτύου γενικότερα.

Ορισμός 3 (Μέσος όρος διάρκειας ζωής δικτύου) *Average Lifetime of Network (%)*, είναι ο συνολικός χρόνος διάρκειας ζωής των cluster heads του τελευταίου επιπέδου προς το σύνολο των cluster heads του τελευταίου επιπέδου. Με αυτό τον τρόπο αξιολογούμε τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Αυτό που θέλουμε είναι το προτεινόμενο πρωτόκολλο να μεγιστοποιεί τη διάρκεια ζωής του δικτύου.

4.4 Οργάνωση Πειραμάτων

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιάσουμε μια συγκριτική αξιολόγηση του πρωτοκόλλου που προτάθηκε στην προηγούμενη ενότητα σε σχέση με τον απλό και κλασικό τρόπο δρομολόγησης των πακέτων δεδομένων από τους cluster heads του τελευταίου επιπέδου απευθείας στον σταθμό βάσης. Η αξιολόγηση γίνεται με την μελέτη της συμπεριφοράς των δύο πρωτοκόλλων σε διάφορα σενάρια κάτω από τις ίδιες συνθήκες.

4.4.1 Παραδοχές

Ισχύει ότι αναφέραμε στην **Ενότητα 4.1**. Επιπλέον, θεωρούμε ότι έχουμε καταγραφή γεγονότων από τους κόμβους αισθητήρων και αποστολή πακέτων δεδομένων προς τους γειτονικούς κόμβους κάθε δευτερόλεπτο. Η ελάχιστη ενέργεια E_{pack} που δαπανάται για την αποστολή ενός πακέτου μεγέθους ενός byte είναι 1 μονάδα. Το μέγεθος των πακέτων δεδομένων είναι σταθερό 1 byte, καθώς και ο αριθμός αυτών που στέλνονται σε κάθε μετάδοση που είναι 2 πακέτα ανά μετάδοση. Οι παραδοχές αυτές γίνονται για την ευκολία της ανάλυσης.

4.4.2 Μελέτη Περίπτωσης: 1

4.4.2.1 Παράμετροι

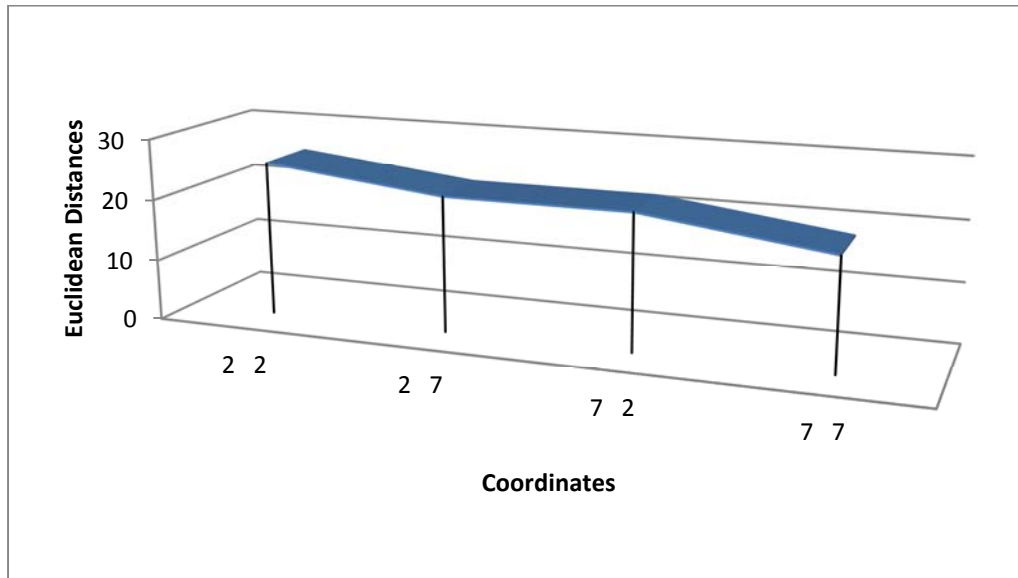
Στον **Πίνακα 4** παρουσιάζουμε τις παραμέτρους προσομοίωσης για την πρώτη μελέτη περίπτωσης. Κατά την προσομοίωση η διαθέσιμη ενέργεια των αισθητήρων τέθηκε σε υψηλά επίπεδα ($E(x,y)=50,100$ και 150) για να αποκλείσουμε την εμφάνιση αποτυχιών λόγω της γρήγορης εξαντλήσεως των ενεργειακών αποθεμάτων των κόμβων αισθητήρων κάτι που θα επηρέαζε τα αποτελέσματα και θα δυσκόλευε την εξαγωγή συμπερασμάτων. Επίσης, η εφαρμογή καταγραφής που εκτελούν οι συσκευές καταγράφει γεγονότα κατά μέσο όρο με ρυθμό λ γεγονότα το δευτερόλεπτο, ενώ κάθε γεγονός γίνεται αντιληπτό από ένα ομοιόμορφα τυχαία επιλεγμένο κόμβο του δικτύου. Η διάρκεια του χρόνου προσομοίωσης είναι τόση όση και η διάρκεια ζωής του τελευταίου cluster head επιπέδου 2.

Πίνακας 4: Παράμετροι Προσομοίωσης για την 1^η μελέτη περίπτωσης.

Παράμετρος Προσομοίωσης	Τιμή
Περιοχή δικτύου	Τετράγωνη 21x21
Θέση σταθμού βάσης	Πάνω δεξιά γωνία (20,20)
Αριθμός κόμβων	100
Αριθμός clusters	4
Αριθμός cluster heads επιπέδου 2	4
Αρχική ενέργεια συσκευών	50,100 και 150
Ρυθμός εμφάνισης γεγονότων	4 events/sec
Μετρικές	Time First Cluster Head Die Average Lifetime of Network

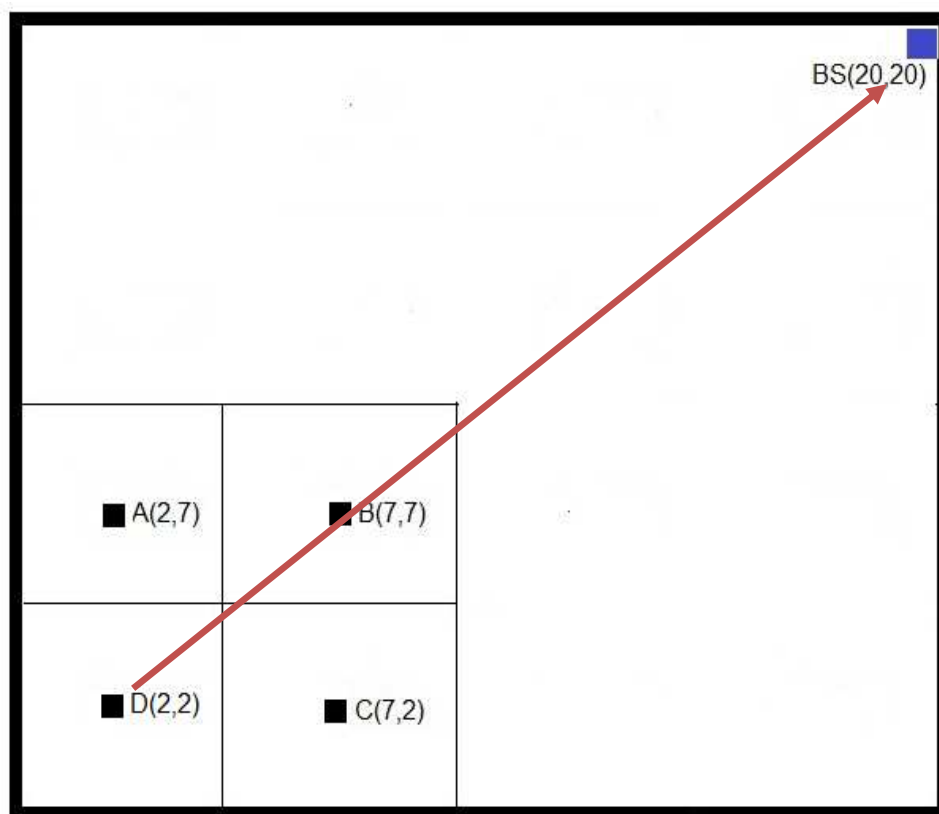
4.4.2.2 Αποτελέσματα

Στην **Εικόνα 23** παρουσιάζουμε ένα γράφημα στο οποίο παρουσιάζονται οι ευκλείδειες αποστάσεις όλων των cluster heads επιπέδου 2 της τοπολογίας από τον σταθμό βάσης.

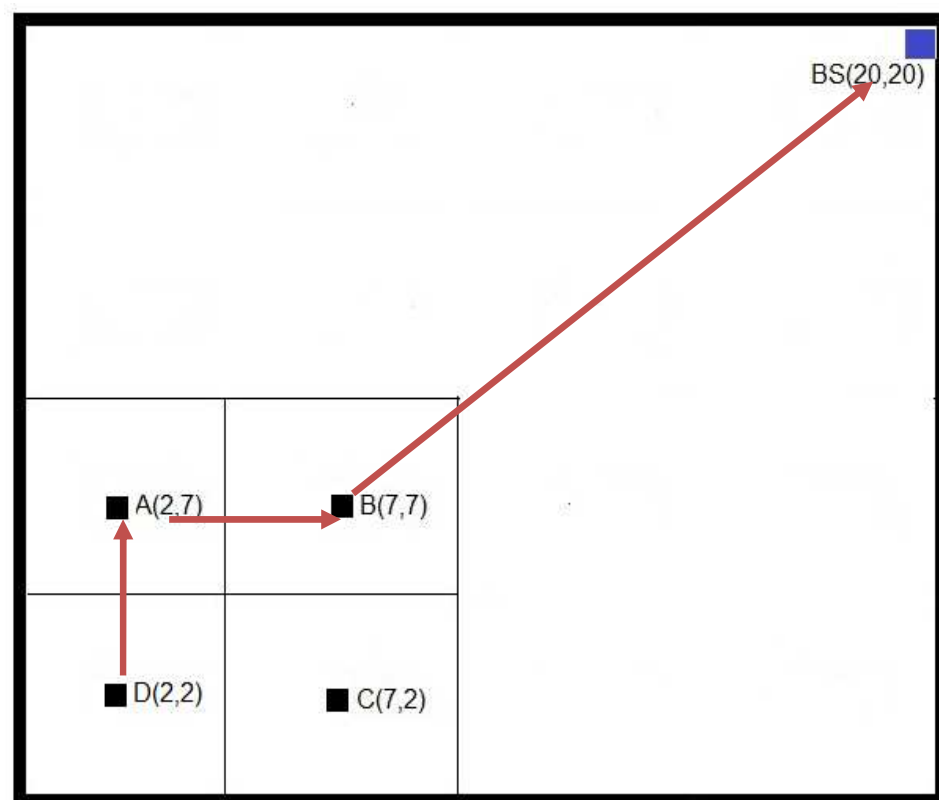


Εικόνα 23: Ευκλείδειες Αποστάσεις των 4 cluster heads επιπέδου 2 από τον σταθμό βάσης.

Στη συνέχεια, γίνεται δρομολόγηση των δεδομένων σύμφωνα το προτεινόμενο πρωτόκολλο και έπειτα με το απευθείας. Στις **Εικόνες 24** και **25** φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο θα γίνει η δρομολόγηση των δεδομένων από τον κόμβο D προς τον σταθμό βάσης για καθένα από τα δύο πρωτόκολλα επικοινωνίας. Για το προτεινόμενο πρωτόκολλο η διαδρομή που θα ακολουθήσουν τα δεδομένα για να φτάσουν στο σταθμό βάσης μπορεί και να είναι διαφορετική για κάθε γύρο επικοινωνίας. Τον ποιο κόμβο θα επιλέξει ο κόμβος D για επόμενο ενδιάμεσο παραλήπτη, όπως έχει αναφερθεί, εξαρτάται από τα ενεργειακά αποθέματα όλων των γειτόνων του.



Εικόνα 24: Δρομολόγηση με το απευθείας πρωτόκολλο.



Εικόνα 25: Δρομολόγηση με το προτεινόμενο πρωτόκολλο.

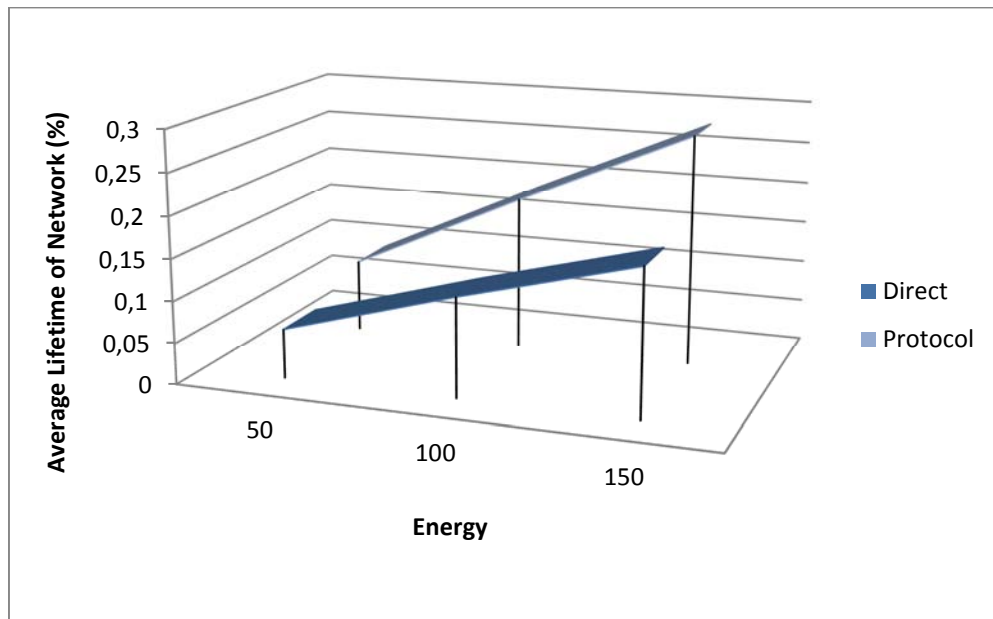
Στον **Πίνακα 5** βλέπουμε τις χρονικές στιγμές που ο πρώτος cluster head επιπέδου 2 της τοπολογίας πεθαίνει για διαφορετικές αρχικές ενέργειες ($E=50, 100$ και 150).

Πίνακας 5: Χρόνος που ο πρώτος cluster head πεθαίνει για διαφορετικές αρχικές ενέργειες.

Ενέργεια	Πρωτόκολλο επικοινωνίας	Time First Cluster Head Die (sec)
50	Προτεινόμενο	6
	Απευθείας	5
100	Προτεινόμενο	13
	Απευθείας	10
150	Προτεινόμενο	19
	Απευθείας	15

Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την ικανότητα του πρωτοκόλλου να αυξάνει τη διάρκεια ζωής ενός κόμβου του δικτύου. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η αρχική ενέργεια των κόμβων αυξάνεται και η διαφορά μεταξύ των χρονικών στιγμών που ο πρώτος cluster head της τοπολογίας πεθαίνει για τα δύο πρωτόκολλα.

Στο γράφημα της **Εικόνας 26** φαίνεται ο μέσος όρος διάρκειας ζωής του δικτύου για διαφορετικές αρχικές ενέργειες. Με τη χρήση του προτεινόμενου πρωτοκόλλου αυξάνεται ο μέσος όρος διάρκειας ζωής του. Αυτό το γράφημα επιβεβαιώνει την ανωτερότητα του προτεινόμενου πρωτοκόλλου σε σχέση με την απευθείας δρομολόγηση των πακέτων στο σταθμό βάσης.

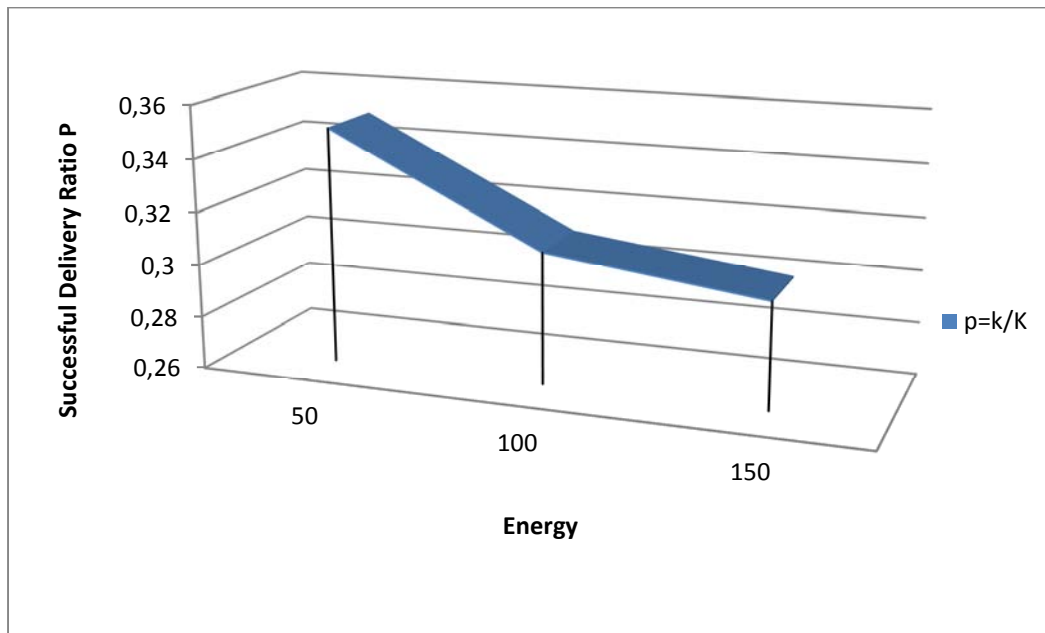


Εικόνα 26: Μέσος όρος διάρκειας ζωής δικτύου για προτεινόμενο και απευθείας πρωτόκολλο.

Στον **Πίνακα 6** βλέπουμε τον αριθμό μηνυμάτων που παραδόθηκαν στον σταθμό βάσης κατά τη δρομολόγηση με το προτεινόμενο πρωτόκολλο και τη συνολική κίνηση στο δίκτυο που αυτό δημιούργησε. Στο γράφημα της **Εικόνας 28** απεικονίζεται το αντίστοιχο ποσοστό επιτυχούς παράδοσης μηνυμάτων στο σταθμό βάσης. Παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται η αρχική ενέργεια το ποσοστό αυτό μειώνεται, καθώς έχουμε περισσότερη επικοινωνία μεταξύ των cluster heads στο δίκτυο.

Πίνακας 6: Αριθμός μηνυμάτων που στάλθηκαν και παραδόθηκαν στον σταθμό βάσης.

Ενέργεια	Αριθμός μηνυμάτων που παραδόθηκε στον σταθμό βάσης	Συνολικός αριθμός μηνυμάτων στο δίκτυο
50	12	34
100	23	74
150	33	111



Εικόνα 27: Ποσοστό επιτυχούς παράδοσης μηνυμάτων για διαφορετικές αρχικές ενέργειες

4.4.3 Μελέτη Περίπτωσης: 2

4.4.3.1 Παράμετροι

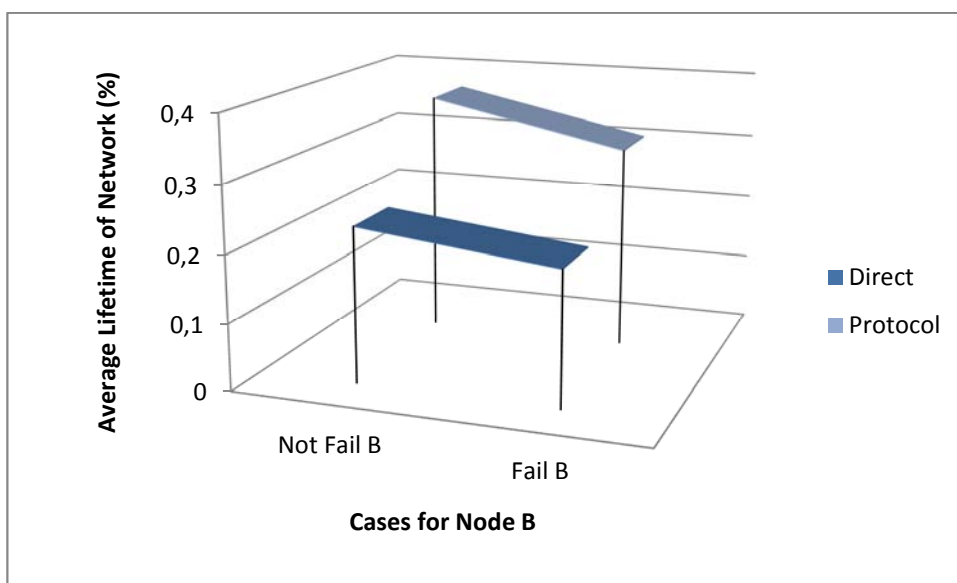
Στον **Πίνακα 7** παρουσιάζουμε τις παραμέτρους προσομοίωσης για την δεύτερη μελέτη περίπτωσης. Η τοπολογία έχει παραμείνει η ίδια με την προηγούμενη μελέτη περίπτωσης. Στην περίπτωση αυτή μελετάμε την συμπεριφορά του προτεινόμενου πρωτοκόλλου σε σύγκριση με το απευθείας, όταν κάποια τυχαία χρονική στιγμή κάποιος από τους cluster heads πάθει βλάβη από φυσικά αίτια. Ο κόμβος που αποτυγχάνει δεν μπορεί να συμμετάσχει περαιτέρω στην δρομολόγηση των δεδομένων. Έστω ότι παθαίνει βλάβη ο κόμβος B που είναι ο κόμβος με την περισσότερη κίνηση στο δίκτυο, καθώς βρίσκεται πιο κοντά στον σταθμό βάσης.

Πίνακας 7: Παράμετροι Προσομοίωσης για την 2^η μελέτη περίπτωσης.

Παράμετρος Προσομοίωσης	Τιμή
Περιοχή δικτύου	Τετράγωνη 21x21
Θέση σταθμού βάσης	Πάνω δεξιά γωνία (20,20)
Αριθμός κόμβων	400
Αριθμός clusters	16
Αριθμός cluster heads επιπέδου 2	16
Αρχική ενέργεια συσκευών	200
Ρυθμός εμφάνισης γεγονότων	4 events/sec
Μετρικές	Average Lifetime of Network
Κόμβος που αποτυγχάνει	B
Χρονική στιγμή αποτυχίας	15sec

4.4.3.2 Αποτελέσματα

Στο γράφημα της **Εικόνας 28** απεικονίζεται ο μέσος όρος διάρκειας ζωής του δικτύου όταν κατά την δρομολόγηση των δεδομένων εφαρμόζεται το απευθείας και το προτεινόμενο πρωτόκολλο για δύο διαφορετικές περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση όλοι οι κόμβοι του δικτύου λειτουργούν κανονικά, ενώ στην δεύτερη περίπτωση ο κόμβος B παθαίνει βλάβη. Παρατηρούμε ότι και πάλι το προτεινόμενο πρωτόκολλο λειτουργεί αποδοτικά. Με τη χρήση του προτεινόμενου πρωτοκόλλου αυξάνεται ο μέσος όρος διάρκειας ζωής του δικτύου.



Εικόνα 28: Μέσος όρος διάρκειας ζωής δικτύου για προτεινόμενο και απευθείας πρωτόκολλο με αποτυχία ή χωρίς στον κόμβο B.

Κεφάλαιο 5ο – Μελλοντική έρευνα -Συμπεράσματα

5.1 Μελλοντική έρευνα –Συμπεράσματα

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελούν την σημαντικότερη εξέλιξη των τελευταίων ετών στις ασύρματες επικοινωνίες. Βέβαια, υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης των υπαρχόντων τεχνολογιών με σκοπό την αποδοτικότερη και πιο αξιόπιστη επικοινωνία. Για το λόγο αυτό η έρευνα που διεξάγεται τόσο σε βασικό όσο και σε εφαρμοσμένο επίπεδο είναι ιδιαίτερα σημαντική, γιατί θα καθορίσει τα μελλοντικά πρότυπα και πρωτόκολλα που θα επιτρέψουν την περαιτέρω εξάπλωση των ασύρματων επικοινωνιών.

Πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με θέματα όπως είναι η βέλτιστη δρομολόγηση των πακέτων, η αποδοτικότερη διαχείριση της ενέργειας αλλά και των πόρων του δικτύου. Επίσης, έρευνα διεξάγεται και στον τρόπο κατανομής των κόμβων στο χώρο, ώστε να βρεθεί η βέλτιστη τοπολογία για κάθε εφαρμογή. Τέλος, υπάρχει σημαντική ερευνητική δραστηριότητα στον τομέα της εφαρμοσμένης έρευνας και ειδικότερα στην ενσωμάτωση των νέων αυτών ασύρματων τεχνολογιών σε όλο και περισσότερους τομείς της σύγχρονης ανθρώπινης δραστηριότητας.

Γενικά, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι μια ανερχόμενη τεχνολογία με στόχο την παρακολούθηση και τον έλεγχο του φυσικού κόσμου. Είναι μια τεχνολογία που θα μπορούσε να αποδειχθεί τόσο σημαντική όσο το Διαδίκτυο. Μάλιστα, όπως αναφέρει χαρακτηριστικά ο καθηγητής του UCLA William Kaiser: *«Το Διαδίκτυο άλλαξε τον τρόπο με τον οποίο δουλεύουμε με τους υπολογιστές. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων θα αλλάξουν τον τρόπο με τον οποίο ζούμε καθημερινά»*.

Βιβλιογραφία

- [1]. Kay Romer and Friedemann Mattern. 'The design space of wireless sensor networks'. In *IEEE Wireless Communications*, Dec. 2004.
- [2]. Ambient Systems. www.ambient-systems.net
- [3]. Crossbow. www.xbow.com
- [4]. TinyOs. www.tinyos.net
- [5]. Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam and Erdal Cayirci. 'A survey on sensor networks'. In *IEEE Communications Magazine*, August 2002.
- [6]. Kemal Akkaya and Mohamed Younis. 'A survey on routing protocols for wireless sensor networks'. Department of Computer Science and Electrical Engineering, University of Maryland, Baltimore County.
- [7]. Jamal N. Al-Karaki Ahmed E. Kamal. 'Routing techniques in wireless sensor networks: a survey'. Dept. of Electrical and Computer Engineering Iowa State University
- [8]. Wendi Rabiner Heinzelman, Anantha Chandrakasan, and Hari Balakrishnan. 'Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks'. In *proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences*, 2000.
- [9]. Kemal Akkaya and Mohamed Younis. 'Energy and QoS aware routing in wireless sensor networks'. Department of Computer Science and Electrical Engineering, University of Maryland, Baltimore County
- [10]. Yongcai Wang, Qianchaun Zhao and Dazhong Zheng. 'Energy-driven adaptive clustering data collection protocol in wireless sensor networks'. Department of Automation, Tsinghua University Beijing, August 2004.
- [11]. Young-ri Choi, Mohamed G. Gouda, Hongwei Zhang, Anish Arora. 'Routing on a logical grid in sensor networks'.
- [12]. M. Youssef, M.Younis and K. Arisha. 'A constrained shortest-path energy-aware routing algorithm for wireless sensor networks'. In the proceedings of the IEEE Wireless Communication and Networks Conference (WCNC 2002), Orlando, FL, March 2002.
- [13]. S. Hedetniemi and A. Liestaman, 'A survey of gossiping and broadcasting in communication networks'. *Networks*, Vol.18, No.4, pp. 319-349, 1988.
- [14]. W. Heinzelman, J.Kulik and H.Balakrishnan, 'Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks'. In *the proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '99)*, Seattle, WA, August 1999.
- [15]. C. Intanagonwiwat, R. Govindan and D. Estrin. 'Directed Diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks'. In *the proceedings of the 6th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '00)*, Boston, MA, August 2000.
- [16]. D. Estrin, et al. 'Next century challenges: Scalable Coordination in Sensor Networks'. In *the proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '99)*, Seattle, MA, August 1999.
- [17]. R. Shah and J. Rabaey. 'Energy aware routing for low energy ad-hoc sensor networks'. In *the proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking conference (WCNC)*, Orlando, FL, March 2002.

- [18]. D. Braginsky and D. Estrin. 'Rumor routing algorithm for sensor networks'. In *the proceedings of the First Workshop Sensor Networks and Applications (WSNA)*, Atlanta, GA, October 2002.
- [19]. C. Schurgers and M.B. Srivastava. 'Energy efficient routing in wireless sensor networks'. In the *MILCOM proceedings on Communications for Network-Centric Operations: Creating the Information Force*, McLean, VA, 2001.
- [20]. M. Chu, H. Haussecker and F. Zhao. 'Scalable information-driven sensor querying and routing for ad-hoc heterogeneous sensor networks'. *The International journal of high performance computing applications*, Vol. 16, No. 3, August 2002.
- [21]. S. Lindsey and C.S. Raghavendra. 'PEGASIS: Power Efficient Gathering in sensor information systems'. In the *proceedings of the IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, Montana, March 2002.
- [22]. S. Lindsey, C.S. Raghavendra and K. Sivalingam. 'Data gathering in sensor networks using the energy delay metric'. In the *proceedings of the IPDPS Workshop on Issues in Wireless Networks and Mobile Computing*, San Francisco, CA, April 2001.
- [23]. A. Manjeshwar and D.P. Agrawal. 'TEEN: A Protocol for Enhanced Efficiency in wireless sensor networks'. In the *Proceedings of the 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing*, San Francisco, CA, April 2001.
- [24]. A. Manjeshwar and D.P. Agrawal. 'APTEEN: A Hybrid Protocol for Efficiency routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks'. In the *Proceedings of the 2nd International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing*, Ft. Lauderdale, FL, April 2002.
- [25]. L. Subramanian and R.H. Katz. 'An architecture for building self configurable systems'. In the *proceedings of IEEE/ACM Workshop on Mobile Ad-hoc Networking and Computing*, Boston, MA, August 2000.
- [26]. V. Rodolphu and T.H. Ming. 'Minimum energy mobile wireless networks'. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, Vol.17, No.8, pp. 1333-1344, 1999.
- [27]. L. Li and J.Y Halpern. 'Minimum energy mobile wireless networks revisited'. In the proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC '01), Helsinki, Finland, June 2001.
- [28]. Y. Xu, J. Heidemann and D. Estrin. 'Geography-informed energy conservation for ad-hoc routing'. In the proceedings of the 7th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '01), Rome, Italy, July 2001.
- [29]. Y. Yu, D. Estrin, and R. Govindan. 'Geographical and Energy-Aware Routing: A recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks'. UCLA Computer Science Department Technical Report, UCLA-CSD TR-01-0023, May 2001.
- [30]. Andreas Savvides, ChihChieh Han and Mani B. Srivastava. 'Dynamic finegrained localization in ad-hoc networks of sensors'.
- [31]. Jeffrey Hightower, Gaetano Borriello. 'Location systems for ubiquitous computing'.
- [32]. Jeffrey Hightower and Gaetano Borriello. 'Location sensing techniques'.
- [33]. K. Kalpakis, K. Dasgupta and P. Namjoshi. 'Maximum lifetime data gathering and aggregation in wireless sensor networks'. In the *Proceedings of IEEE International Conference on Networking (NETWORKS '02)*, Atlanta, GA, August 2002.

- [34]. F. Ye, A. Chen, S. Liu, L. Zhang. 'A scalable solution to minimum cost forwarding in large sensor networks'. In the *Proceedings of the 10th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*, pp. 304-309, 2001.
- [35]. K. Sohrabi, J. Gao, V. Ailawadhi and G.J. Pottie. 'Protocols for self-organization of a wireless sensor network'. *IEEE Personal Communications*, October 2000, pp. 16-27.
- [36]. T. He et al. 'SPEED: A stateless protocol for real-time communication in sensor networks'. In the *Proceedings of International Conference on Distributed Computing Systems*, Providence, RI, May 2003.
- [37]. E. Shih, S. Cho, N. Ickes, R. Min, A. Sinha, A. Wang and A. Chandrakasan. 'Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks'. In the *proceedings of ACM MobiCom '01*, Rome, Italy, July 2001, pp. 272-286.
- [38]. A. Cerpa and D. Estrin. 'ASCENT: adaptive self-configuring sensor networks topologies'. *UCLA Computer Science Department Technical Report UCLA/CSDTR-01-0009*, May 2001.
- [39]. G.J. Pottie and W.J. Kaiser. 'Wireless integrated network sensors'. *Communications of the ACM* 43 (5) (2000) 551-558.
- [40]. A. Sinha, A. Chandrakasan. 'Dynamic power management in wireless sensor networks'. *IEEE Design and Test of Computers*, March/April 2001.
- [41]. K. Govil, E. Chan and H. Wasserman. 'Comparing algorithms for dynamic speed-setting of a low-power CPU'. In the *proceedings of ACM MobiCom'95*, Berkeley, CA, November 1995, pp. 13-25.
- [42]. J. Lorch and A. Smith. 'Reducing processor power consumption by improving processor time management in a single-user operating system'. In the *proceedings of ACM MobiCom'96*, 1996.
- [43]. Weiser et al. 'Scheduling for reduced CPU energy'. In the *proceedings of 1st USENIX Symposium on Operating System Design and Implementation*, November 1994, pp. 13-23.
- [44]. Ivan Stojmenovic and Xu Lin. 'Power-aware localized routing in wireless networks'. In *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, Vol 12, No. 10, October 2001.
- [45]. Konstantinos P. Ferentinos, Theodore A. Tsiligiridis and Konstantinos G. Arvanitis. 'Energy optimization of wireless sensor networks for environmental measurements'. In *CIMSA 2005-IEEE International Conference on Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications Giardini Naxos*, Italy, 20-22 July 2005.
- [46]. Josh Broch David A., Maltz David B., Johnson Yih-Chun Hu and Jorjeta Jetcheva. 'A performance comparison of multi-hop wireless Ad Hoc network routing protocols'. In *Proceedings of the Fourth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'98)*, October 25-30, 1998, Dallas, Texas, USA.
- [47]. Tim Daniel Hollerung. 'The cluster-based routing protocol'. Project group "Mobile Ad-Hoc Networks Based on Wireless LAN", winter semester 2003/2004.
- [48]. Ritabrata Roy. 'Maximum system lifetime routing in Ad-Hoc networks a critical study'. Department of Electrical and Computer Engineering the George Washington University Washington.

- [49]. Nalin VimalKumar Subramanian. '*Survey on energy-aware routing and routing protocols for sensor networks*'. Department of Computer Science University of North Carolina Charlotte, North Carolina, USA.
- [50]. Joongseok Park, Sartaj Sahni. '*Maximum lifetime routing in wireless sensor networks*'. Computer & Information Science & Engineering University of Florida. June 2, 2005.
- [51]. Curt Schurgers, Mani B. Srivastava. '*Energy efficient routing in wireless sensor networks*'. Networked & Embedded Systems Lab (NESL), Electrical Engineering Department University of California at Los Angeles (UCLA), CA.
- [52]. Wen-Hwa Liao, Yu-Chee Tseng, and Lang-Ping Sheu. '*GRID: a fully location – aware routing protocol for mobile Ad Hoc networks*'. Department of Computer Science and Information Engineering, National Central University, Taiwan.
- [53]. Srajan Raghuwanshi. '*An energy efficient cross layer design scheme for wireless sensor networks*'. Department of Electrical and Computer Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University. August 29th 2003. Blacksburg Virginia.
- [54]. Sameer Tilak, Nael B. Abu-Ghazaleh and Wendi Heinzelman. '*A taxonomy of wireless micro-sensor network models*'.
- [55]. Ning Xu. '*A Survey of sensor network applications*'. Computer Science Department, University of Southern California.
- [56]. Wireless Sensor Network. <http://en.wikipedia.org>